

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

UNIVERSITE MONTPELLIER 2



\*\*\*\*\*



THESE EN CO-TUTELLE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MONTPELLIER 2 ET DE L'UNIVERSITE

D'ANTANANARIVO

Discipline : Mécanique et Génie Civil

Ecole Doctorale : Information, Structure et systèmes

---

Déterminisme génétique et environnemental des propriétés du bois de  
*Liquidambar styraciflua* L. de la Mandraka : adaptation aux reboisements  
malgaches et apports à la production ligneuse

---



Présentée et soutenue publiquement par

Herizo RAKOTOVOLOLONALIMANANA

Le 29 octobre 2013



**JURY**

M. Jean-Michel LEBAN

INRA, Nancy

Rapporteur

M. Philippe ROZENBERG

INRA, Orléans

Rapporteur

M. Bernard THIBAUT

Président

M. Roberto BACILIERI

INRA-CIRAD- Sup Agro, Montpellier

Examineur

Mme. Lolona RAMAMONJISOA

Université d'Antananarivo

Co-directrice de thèse

Mme. Marie-France THEVENON

CIRAD, Montpellier

Co-directrice de thèse

M. Gilles CHAIX

CIRAD, Brésil

Invité

Mme. Tahiana

Université d'Antananarivo

Invitée

RAMANANANTOANDRO





*« Comme le coureur de fond, le doctorant doit tenir la distance, mais à la différence du marathonien, personne n'a tracé pour lui de ligne d'arrivée. Le plus dur dans la thèse, c'est de finir ».* Héloïse Lhérété

*«Les deux guerriers les plus puissants sont la patience et le temps. N'oublie pas que les grandes réalisations prennent du temps et qu'il n'y a pas de succès du jour au lendemain» : Léon Tolstoï*

## REMERCIEMENT

Ce travail de thèse n'aurait pas lieu sans les essais de plantation de *Liquidambar styraciflua* du DRFP/FOFIFA, le financement de l'AUF et du CIRAD.

Ensuite, je tiens à remercier Jean-Michel LEBAN et Philippe ROZENBERG d'avoir accepté de rapporter ce travail et de siéger parmi les membres de jury. Sans vos accords et commentaires, tous mes efforts étaient en vain.

Je remercie vivement aussi Bernard THIBAUT d'avoir présidé le jury de soutenance de cette thèse.

Je tiens aussi à remercier mes deux co-directrices de thèse Marie France THEVENON et Lolona RAMAMONJISOA pour leurs aides et conseils tout au long de ce travail de thèse.

Un grand merci aussi à Tahiana RAMANANANTOANDRO et Gilles CHAIX, qui sont les promoteurs de cette thèse ainsi que pour leurs conseils, aides et encouragements pour la réalisation de ce travail.

Des remerciements sincères à toutes les personnes qui ont collaboré à l'élaboration de cette recherche, spécialement à :

Bruno Salomon RAMAMONJISOA

Daniel GUIBAL

Daniel VERHAEGEN

Gaspard LECLERCQ

Hery RAKOTONDRAOELINA

Honoré RANDRIANJAFY

Jean GERARD

Joseph GRIL

Loïc BRANCHERIAU

Marie DENIS

Nicolas LEMENAGER

Olivier ARNOUD

Patrick LANGBOUR

Philippe GALLET

Pierre ALART

Sébastien PARADIS

Solofo

Sophie NOURISSIER-MOUNTOU



Sylvain LOTTE

Je n'arrive pas à citer toutes les personnes; ainsi j'adresse mes sincères gratitudes à l'équipe de l'ESSA-Forêts, du SNGF, du DRFP/FOFIFA, de l'UMR AGAP, de l'UPR BioWooEB, du LMGC pour leurs contributions à la réalisation de ce travail de thèse

Je voudrais aussi exprimer ma gratitude à tous mes amis qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre pendant la réalisation de ce travail.

J'aimerais remercier ma famille pour leur support et pour l'inspiration dont j'ai été bénéficiaire.

Finalement, un grand merci à Carole et Christianah Rhian'Tsoa pour leurs patiences, encouragements et confiances qu'elles ont toujours eu en moi tout au long de ce travail.

## Résumé

Afin de préserver les forêts naturelles malgaches, reconnues comme sources de mégabiodiversité, tout en remplissant les besoins en bois du marché local, les forêts de plantation présentent un enjeu crucial pour Madagascar. Cependant, les bois provenant des plantations forestières malgaches, généralement dominées par les espèces du genre *Eucalyptus* et *Pinus*, offrent un choix limité et n'ont pas toutes les qualités requises pour se substituer aux bois des forêts naturelles notamment pour l'ameublement et la menuiserie. Le bois de *Liquidambar styraciflua* est utilisé dans de nombreux pays en ameublement, emballage ou pour la fabrication de contreplaqués. Ce travail de thèse a pour objectif de contribuer à l'amélioration du *Liquidambar styraciflua* pour une sylviculture et une utilisation de son bois adaptées au contexte malgache. L'approche ici est originale, car elle combine l'étude des caractères de croissance au champ, la production et la qualité grainière, la croissance juvénile et les propriétés des bois tout en considérant la variabilité génétique de l'espèce. Cette étude repose sur un essai de provenances de *Liquidambar* situé sur le site de la Mandraka, âgé de 25 ans, faisant parti d'un réseau d'essais internationaux sous l'égide du Commonwealth Forestry Institute. Ce travail de thèse a mis en évidence la bonne adaptation du *Liquidambar* aux conditions de la Mandraka avec une croissance plus élevée par rapport aux autres essais. La croissance de *Liquidambar* à Mandraka est semblable à celle des espèces du genre *Eucalyptus* et meilleure par rapport à celle des *Pinus* plantés dans les mêmes conditions écologiques. La production grainière du *Liquidambar* observée est plus élevée que dans son aire naturelle de distribution et les graines présentent une vitesse et un taux germination de 75% et de 83 % respectivement. Ceci confirme la bonne adaptation de l'espèce à la région considérée. Les arbres dont la croissance est plus élevée produisent des graines plus fertiles et les semis ont une croissance juvénile plus rapide (jusqu'à 1,5 ans). Les méthodes indirectes de caractérisation du bois basées sur les mesures standardisées, utilisées ici (Spectrométrie Proche Infra-Rouge, ultrasons) se sont avérées efficaces pour estimer les propriétés physico-mécaniques du bois de *Liquidambar*. Les propriétés physico-mécaniques du bois de *Liquidambar*, meilleurs pour les arbres dominants, restent toutefois moyennes parmi celles des bois communément utilisés à Madagascar. Les extractibles du bois de *Liquidambar* sont à l'état de traces et son bois n'est pas durable face aux attaques des termites du genre *Reticulitermes* et aux champignons *Coniophora puteanea* et *Coriolus versicolor*. Des corrélations phénotypiques faibles à fortes ont été observées entre les propriétés physico-mécaniques. Ceci suggère qu'une amélioration sylvicole ou génétique visant à augmenter la valeur d'une propriété donnée pourrait avoir pour conséquence d'augmenter ou de diminuer la

valeur d'autres. Les propriétés physicomécaniques du bois de Liquidambar varient de façon linéaire ou logarithmique de la moelle à l'écorce et on observe du bois de tension et du bois normal. Sur la base de nos travaux et en accord avec la bibliographie dans le domaine, les caractères de croissance et de multiplication, comme la plupart des propriétés physiques et mécaniques de Liquidambar sont sous fort contrôle génétique. Cette étude recommande ainsi d'intégrer ces critères et leurs inter-corrélations dans le futur programme d'amélioration génétique du bois de Liquidambar.

**Mots clés :** Liquidambar, Madagascar, adaptation, variabilité, propriétés physico-mécaniques, amélioration génétique

## Abstract

Beyond the clearance for agricultural, the filling of the deficiency of wood as energy and material for the Malagasy local market takes part in the reduction of the forest cover in Madagascar. In order to preserve Malagasy natural forests, known to be a mega-biodiversity reservoir, with also full-filling the local demand in wood, the plantation forests represent a crucial challenge. Nevertheless, the timbers coming from the planted Malagasy forest, generally dominated by Eucalyptus and Pine species, offer less choice and do not have the required qualities to substitute the timber from natural forest, especially for carpentry, joinery and furniture manufacturing. *Liquidambar styraciflua* timber is used in many countries for packaging, veneer, plywood and furniture production. The objective of this work is to contribute to the improvement of *Liquidambar styraciflua* for a forestry and end-use in ad equation with the Malagasy context. The approach used is original because it combines the study of the growing characteristics in the field, the production and the quality of the seeds, the juvenile growth and the wood properties, with considering also the genetic variability of the species. In order to do so, the inventory annual data of the provenance trial of Liquidambar in Mandraka has allowed evaluating the adaptation of this species and the intra-specific variability of its growth. Seed samplings, germination tests and tree nursery growth tests have been performed to evaluate the multiplication ability and its variability in order to state about the vulgarization possibility for this species. Finally, this work was also about the characterization of physic-mechanical and natural durability properties of Liquidambar timber. Once these trials and experiments completed, this work showed that Liquidambar from Mandraka presents a good adaptability associated with an important growth compared to other Liquidambar international provenance trials done by the Commonwealth Forestry Institute. Moreover, the growth of Liquidambar from Mandraka is similar to *Eucalyptus* species and better than *Pinus* species when planted in the same ecological environment.

The seed production of Liquidambar from Mandraka is higher than in its natural distribution area. Its seeds present a high speed and rate of germination of 75% and 83%, respectively. This confirms the good adaptation of this species for the considered studied conditions.

Our study suggest that tallest trees produce more fertile seeds and seedlings have a more rapid juvenile growth (up to 425 days) compared to seedlings coming from smaller mother tree. This work has also brought into light that indirect methods such as Near Infra-Red Spectroscopy, ultrasonic methods were efficient to estimate the physic-mechanical properties of Liquidambar timber, in addition to the standardized methods used. The physico-mechanical properties of Liquidambar timber are average compared to the most commonly used.

Liquidambar timber extractible content is very low and it is not durable neither towards *Reticulitermes* termites, nor *Coniophora puteanea* and *Coriolus versicolor* Basidiomycete fungi. Low to strong phenotypic correlations between the physic-properties have been observed ; suggesting that a genetic or silvicultural improvement aiming to up-grade a property (physic or mechanic) could, in consequence, increase or decrease the value of another physico-mechanical property. Nevertheless, it would be interesting to get adequate experiments (test descendence from cross experiments) to estimate the genetic correlations.

Concerning the variability, the physico-mechanical properties of Liquidambar timber follow a linear or logarithmic tendency from pith to bark, and normal, as well as tension wood was observed. The growing and multiplication characteristics of liquidambar are more variable than its physico-mechanical properties. However, the physico-mechanical properties are more variable for thinned out trees than for of dominant ones. Based on our study, and in accordance with the bibliography in this field, the growing and multiplication characters, such as physico-mechanical properties (except for axial compression modulus, as well as radial and tangential shrinkage) of Liquidambar are under strong genetic control. This study recommends including these criteria and their inter-correlations for a further genetic improvement program of Liquidambar.

**Key words:** Liquidambar, Madagascar, adaptation, variability, physico-mechanical properties, genetic improvement

## LEXIQUE

AAMD	Accroissement Annuel Moyen en Diamètre (cm/an)
AAMH	Accroissement Annuel Moyen en Hauteur (m/an)
b	Largeur d'une poutre (mm)
C	Module de rupture en compression axiale (Mpa)
C <sub>-SPIR</sub>	Module de rupture en compression axiale prédit par SPIR
D ou Ø	Diamètre (cm)
DN	Durabilité naturelle
E	Module d'élasticité (Mpa)
EL*-10	Module d'élasticité longitudinal simulé pour les baguettes de 10x20x20mm (Mpa)
EL*-360	Module d'élasticité longitudinal simulé pour les baguettes de 360x20x20mm (Mpa)
EL-10	Module d'élasticité longitudinal estimé par Usan sur les éprouvettes de 10x20x20mm (Mpa)
EL-360	Module d'élasticité longitudinal estimé par Usan sur les éprouvettes de 360x20x20mm (Mpa)
EL-Bing	Module d'élasticité longitudinal estimé par BING (Mpa)
EL <sub>-SPIR</sub>	Module d'élasticité longitudinal prédite par SPIR
EL <sub>-UScan</sub>	Module d'élasticité longitudinal mesuré par Usan
G	Module de cisaillement (Mpa)
H	Hauteur (m)
h	Hauteur d'une poutre (mm)
h <sup>2</sup> G	Héritabilité génotypique ou héritabilité au sens large
infra	Infradensité
Infra <sub>-SPIR</sub>	Infradensité prédit par SPIR
LR	Plan longitudinal radial
LT	Plan longitudinal tangentiel
M	Million
Md	Milliard
N	Dureté Monnin
n	Nombre d'échantillon
N <sub>-SPIR</sub>	Dureté Monnin prédite par SPIR
P	Probabilité de retour
PSF	Point de Saturation des Fibres (%)
PSF <sub>-SPIR</sub>	Point de Saturation des Fibres prédit par SPIR
Rr	Retrait radial (%)
Rr <sub>-SPIR</sub>	Retrait radial prédit par SPIR

RT	Plan radial tangentiel
Rt	Retrait tangentiel (%)
Rt <sub>SPIR</sub>	Retrait tangentiel prédit par SPIR
S	Section d'une poutre
T	Température (°C)
V	Vitesse de propagation de l'onde (m/s)
$\nu$	Coefficient de Poisson
$\rho$	Masse volumique
$\rho$ ou Mvol	Masse volumique à 12% d'humidité (Kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma_F$	Module de rupture en flexion longitudinale (Mpa)
$\sigma_{F\_SPIR}$	Module de rupture en flexion longitudinale prédit par SPIR

## LISTE DES ABREVIATIONS

AHEC	American Hardwood Export Council
ANOVA	Analysis Of Variance
AOSA	Association of Official Seed Analysts
ASTM	American Society for Testing and Materials
BING	Beam Identification for Nondestructive Grading
CFI	Commonwealth Forestry Institute
CIRAD	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
DRFP	Département des Recherches Forestières et Piscicoles
EN	European Norme
ESSA	Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
FAO	Food and Agriculture Organization
FOFIFA	FOibem-pirenena ho an'ny Fikarohana ampiharina ho Fampanandrosoana ny eny Ambanivohitra ou Centre National de Recherche Appliquée au Développement Rural de Madagascar
ISTA	International Rules for Seed Testing
MEF	Ministère de l'Environnement et des Forêts
NF	Normes Françaises
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economiques
RPD	Ratio Performance Deviation
SNGF	Silo National des Graines Forestières
SNV	Standard Normal Variate
SPIR	Spectrométrie Proche Infra Rouge

USA	United States of America
USAID	United States Agency for International Development
USDA	United States Department of Agriculture



## TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1- Le bois, un matériau incontournable .....	1
2- Objectifs, questions et hypothèses de travail .....	4
2-1- Objectifs de travail.....	4
2-2-Questions de travail .....	5
2-3-Hypothèses de travail.....	5
 <b>PARTIE I : REVUE DE LITTERATURE .....</b>	 <b>7</b>
I- ETUDE DE L'ARBRE ET DE SON BOIS.....	8
1-1- L'arbre et la formation du bois.....	8
1-2- Pourquoi et comment étudier l'arbre et la forêt ?.....	9
1-3- Variations génétique et environnementale des paramètres de multiplication et de croissance des arbres .....	10
1-4- Pourquoi étudier le bois ?.....	11
1-5- Différentes approches de la caractérisation du bois .....	11
1-6- Variabilité radiale des propriétés du bois .....	12
1-7- Effet de la provenance, de l'environnement et de leurs interaction sur les propriétés du bois .....	13
II- GENERALITES SUR LIQUIDAMBAR STYRACIFLUA L. ....	15
2-1- Ecologie de Liquidambar styraciflua .....	15
2-2- Biologie de reproduction de Liquidambar styraciflua.....	16
2-3- Morphologie de Liquidambar styraciflua.....	19
2-4- Atouts et faiblesses de l'arbre sur pied.....	20
2-5- Anatomie du bois de Liquidambar .....	20
2-6- Utilisation du bois de cœur et de l'aubier de Liquidambar .....	22
2-7- Caractéristiques technologiques et propriétés du bois de Liquidambar .....	23
III- L'ESSAI DE PROVENANCE DE LIQUIDAMBAR STYRACIFLUA L. A MANDRAKA .....	24
3-1- Dispositif de l'essai de provenances à Mandraka .....	24
3-2- Suivis et entretiens réalisés dans l'essai de provenances à Mandraka .....	26
<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>27</b>

**PARTIE II : DEMARCHE GENERALE DE L'ETUDE..... 28**

**PARTIE III : ETUDE DE LIQUIDAMBAR STYRACIFLUA L. DE MANDRAKA .... 32**

CHAPITRE I : ADAPTATION ET VARIABILITE GENETIQUE DE LA CROISSANCE DE LIQUIDAMBAR STYRACIFLUA L. DU VERGER DE MANDRAKA (MADAGASCAR).....	33
I- INTRODUCTION.....	33
II- MATERIELS ET METHODES .....	34
2-1-Matériel végétal .....	34
2-2-Paramètres considérés.....	35
2-3-Méthode d'analyse.....	35
2-4-Estimation de l'héritabilité des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar .....	36
III- RESULTATS .....	38
3-1-Croissance de Liquidambar styraciflua à Mandraka (verger).....	38
3-2-Variabilité intraspécifique de la croissance de Liquidambar styraciflua du verger de Mandraka.....	39
3-3-Adaptation et croissance de Liquidambar dans les autres sites d'introduction .....	40
IV- DISCUSSION .....	43
4-1-Croissance de Liquidambar .....	43
4-2-Adaptation de Liquidambar sur le verger de Mandraka .....	44
CONCLUSIONS .....	46

CHAPITRE II : CAPACITE ET VARIABILITE DES PARAMETRES DE MULTIPLICATION ET CORRELATION DES VALEURS PARENTS-DESCENDANTS DE L'ESSAI DE PROVENANCES DE LIQUIDAMBAR STYRACIFLUA L. PLANTE A MANDRAKA .....	48
I- INTRODUCTION.....	48
II- MATERIELS ET METHODES .....	50
2-1- Matériels d'étude .....	50
2-2- Démarche de l'étude.....	51
2-2-1- Estimation de la productivité grainière et du poids de 1000 graines .....	51
2-2-2-Mise en place des essais de germination et de suivi de la croissance juvénile des descendances de Liquidambar.....	51
2-2-3-Evaluation de la vitesse de germination et de la germination .....	53

2-2-4-Mesures de la croissance juvénile des semis, des arbres-mères et des individus de l'essai de provenances .....	54
2-2-5-Analyse statistique des données .....	54
III- RESULTATS ET DISCUSSION .....	57
3-1-Productivité grainière et poids de 1000 graines de Liquidambar de Mandraka .....	57
3-2-Vitesse de germination et germination des graines de Liquidambar de Mandraka...	58
3-3-Variabilité et héritabilité de la vitesse de germination et de la germination des graines de Liquidambar .....	59
3-4-Variabilité de la croissance juvénile du Liquidambar de Mandraka .....	61
3-5-Taux de survie des jeunes plants de Liquidambar en pépinière .....	63
3-6 Etude des corrélations .....	64
CONCLUSIONS .....	66

CHAPITRE III: VARIABILITE INTRA-ARBRE DES PROPRIETES PHYSICO-MECANQUES ET DURABILITE NATURELLE DU BOIS DE LIQUIDAMBAR STYRACILFUA L. AGES DE 23 ET 24 ANS PLANTES A MANDRAKA .....	68
I- INTRODUCTION.....	68
II- METHODOLOGIE .....	70
2-1-Matériel d'étude.....	70
2-2-Identification du bois de tension et du bois normal chez le bois de Liquidambar de Mandraka.....	71
2-3-Détermination des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar .....	71
2-4-Classification de la croissance suivant les valeurs du diamètre .....	72
2-5- Détermination de la durabilité naturelle du bois de Liquidambar .....	72
2-6-Détermination du taux d'extractibles du bois de Liquidambar .....	74
2-7-Analyses statistiques et traitement des données .....	77
III- RESULTATS ET DISCUSSION .....	77
3-1-Propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar .....	77
3-2-Taux d'extractibles du bois de Liquidambar .....	80
3-3-Durabilité naturelle vis-à-vis des termites .....	80
3-4-Durabilité naturelle par les champignons .....	81
3-5-Corrélation entre les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar .....	82
3-6-Variabilité intra-arbre des propriétés physico-mécaniques et de durabilité naturelle du bois de Liquidambar .....	85

CONCLUSIONS .....	89
-------------------	----

#### CHAPITRE IV : CARACTERISATION DES PROPRIETES PHYSICO MECANQUES DU BOIS DE

LIQUIDAMBAR STYRACIFLUA DE MANDRAKA PAR METHODES NON DESTRUCTIVES .....	91
---	----

I- INTRODUCTION.....	91
----------------------	----

II- MATERIELS ET METHODES.....	92
--------------------------------	----

2-1-Matériels d'étude .....	92
-----------------------------	----

2-2-Paramètres mesurés .....	93
------------------------------	----

2-3-Démarche de vérification du module obtenu par ultrason.....	93
---	----

2-4-Mesures ultrasonores .....	94
--------------------------------	----

2-5-Correction de la vitesse de propagation par considération de l'effet poisson .....	95
--	----

2-6-Acquisition des spectres d'absorption proche infra rouge.....	96
---	----

2-7-Calibration du modèle de prédiction par spectroscopie.....	97
--	----

III- RESULTATS ET DISCUSSION .....	98
------------------------------------	----

3-1-Caractéristiques du dispositif ultrasonore et qualité du signal .....	98
---	----

3-2-Incertitude de mesure.....	99
--------------------------------	----

3-3-Comparaison des valeurs du module d'élasticité longitudinal obtenues par ultrason et par BING .....	100
---	-----

3-4-Modèles de prédictions par SPIR des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar .....	104
--	-----

3-5-Comparaison des valeurs des propriétés physico-mécaniques prédites sur carottes par rapport aux valeurs mesurées par les méthodes ultrasonores et acoustiques .....	106
---	-----

3-6-Comparaison du Module d'élasticité prédit par SPIR et par UScan sur les carottes .....	108
--	-----

CONCLUSIONS .....	109
-------------------	-----

#### CHAPITRE V : ETUDE DE LA VARIABILITE ET DU CONTROLE GENETIQUE DES PROPRIETES

PHYSICO-MECANQUES DU BOIS DE LIQUIDAMBAR STYRACIFLUA L .....	111
--	-----

I- INTRODUCTION.....	111
----------------------	-----

II- MATERIEL ET METHODES .....	112
--------------------------------	-----

2-1- Matériel d'étude et paramètres mesurés .....	112
---	-----

2-2-Analyses des données .....	113
--------------------------------	-----

III- RESULTATS ET DISCUSSION .....	114
------------------------------------	-----

3-1-Variabilité intra arbre des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar dominant à Mandraka.....	114
3-2-Variabilité inter-arbre et héritabilité des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar .....	119
CONCLUSIONS .....	123
<b>PARTIE IV : DISCUSSION GENERALE .....</b>	<b>125</b>
<b>CONCLUSIONS GENERALES.....</b>	<b>130</b>
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	135
<b>ANNEXES.....</b>	<b>1</b>

#### LISTE DES CARTES

Carte 1 : Aire naturelle de distribution de <i>Liquidambar styraciflua</i> L.....	16
Carte 2: Localisation des provenances de <i>Liquidambar styraciflua</i> dans son aire naturelle ...	25
Carte 3 : Zones d'introduction et localisation de l'essai de provenances de <i>Liquidambar styraciflua</i> à Madagascar.....	34

#### LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Croissance verticale de l'arbre.....	8
Figure 2 : Croissance radiale d'un arbre et différentes parties d'un bois.....	9
Figure 3: (a) : 3 axes du plan ligneux (b) : différentes coupes de référence .....	9
Figure 4 : Effet génotype x environnement, Cas 1 (Kremer, 1986).....	14
Figure 5 : Effet génotype x environnement, Cas 2 (Kremer, 1986).....	14
Figure 6 : Effet génotype x environnement, Cas 3 (Kremer, 1986).....	15
Figure 7 : Perforation de la plaque scalariforme de bois de Liquidambar .....	21
Figure 8 : Anatomie du bois de Liquidambar .....	21
Figure 9 : Pores diffus de bois de Liquidambar .....	21
Figure 10 : Dispositif expérimental de l'essai provenances à Mandraka.....	26
Figure 11 : Type de sol à Mandraka.....	26
Figure 12 : Récapitulatif de la démarche générale de l'étude .....	31
Figure 13 : Dispositif de semis des graines de Liquidambar .....	53

Figure 14 : Taux de survie à 425 mois des jeunes plants de Liquidambar suivant les provenances .....	64
Figure 15 : Corrélations entre hauteur moyenne des provenances et taux de survie des jeunes plants de Liquidambar à 425 mois .....	64
Figure 16: Corrélation entre perte de masse due aux attaques de termites et masse volumique .....	81
Figure 17 : Variation radiale de la masse volumique du bois de Liquidambar.....	86
Figure 18 : Variation radiale du Module d'Elasticité du bois de Liquidambar.....	86
Figure 19 : Variation radiale du module de rupture en flexion du bois de Liquidambar.....	87
Figure 20 : Variation radiale du module de rupture en compression du bois de Liquidambar .....	87
Figure 21 : Variation radiale de la dureté Monnin du bois de Liquidambar .....	87
Figure 22: Variation radiale de l'infradensité du bois de Liquidambar .....	87
Figure 23 : Variation radiale du PSF du bois de Liquidambar.....	88
Figure 24 : Variation radiale de la perte de masses du bois de Liquidambar délavé par <i>Coriolus versicolor</i> .....	88
Figure 25: Résumé de la démarche de la vérification du EL obtenu par ultrason par rapport au EL obtenu par méthode normalisée.....	93
Figure 26: schéma d'une poutre orthotrope .....	95
Figure 27 : caractéristique des signaux ultrasonores.....	99
Figure 28 : Régression entre EL-360 et EL-Bing .....	101
Figure 29 : Régression entre EL-Bing et EL-10 .....	101
Figure 30 : Régression entre EL-360 et EL-10.....	102
Figure 31 : Box plot de EL-36, EL-10 et EL-Bing .....	102
Figure 32 : corrélation entre le EL estimé par ultrason et prédit par SPIR sur les carottes de bois de Liquidambar.....	109
Figure 33 : variation radiale des propriétés physiques du bois des arbres dominants et co-dominants de Liquidambar à Mandraka .....	117
Figure 34 : variation radiale des propriétés mécaniques du bois des arbres dominant et co-dominants de Liquidambar à Mandraka .....	118
Figure 35 : Effet de l'interaction bloc x provenance sur les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar .....	122

## **LISTE DES PHOTOGRAPHIES**

Photographie 1: inflorescences de <i>Liquidambar styraciflua</i> .....	17
--	----

Photographie 2: Fleur de <i>Liquidambar styraciflua</i> à différents stades de réceptivité.....	18
Photographie 3: fruits de <i>Liquidambar styraciflua</i> à différents stades de maturité .....	18
Photographie 4 : Plant de <i>Liquidambar styraciflua</i> de 3 ans utilisé comme ornementation dans la ville d’Antananarivo .....	19
Photographie 5 : Feuille à cinq lobes de <i>Liquidambar styraciflua</i> de l’arboretum d’Ambatobe .....	19
Photographie 6: Essai de provenances de <i>Liquidambar styraciflua</i> âgé de 22 ans à Mandraka .....	19
Photographie 7 : Meuble de rangement en bois de Liquidambar .....	22
Photographie 8 : Cuisine fabriquée avec du bois de Liquidambar utilisé en placage .....	22
Photographie 9 : Rejet de souche de <i>Liquidambar styraciflua</i> du verger à Mandraka .....	41
Photographie 10 : Sauvageons de <i>Liquidambar styraciflua</i> du verger à Mandraka .....	41
Photographie 11 : Dispositif de semis.....	53
Photographie 12: Extraction de <i>Liquidamba styraciflua</i> par la méthode de Soxhlet.....	75
Photographie 13 : Sciure de Liquidambar avant extraction (dans les sachets plastiques) et après extraction (dans les boîtes de pétris).....	75
Photographie 14 : Attaques de termites sur le bois de Liquidambar après 8 semaines.....	81
Photographie 15 : Disque de Liquidambar avant coloration.....	86
Photographie 16 : Disque de Liquidambar après coloration par chloro-iodure de zinc.....	86
Photographie 17 : Dispositif ultrasonore (UScan) .....	94

## LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1 : Caractéristiques physico-mécaniques du bois de <i>Liquidambar styraciflua</i> d’Amérique.....	23
Tableau 2: Caractéristiques des provenances de Liquidambar introduites à Mandraka .....	25
Tableau 3 : Tableau d’analyse de variances.....	37
Tableau 4 : Caractéristiques dendrométriques du <i>Liquidambar styraciflua</i> du verger de Mandraka.....	39
Tableau 5: Comparaison de la moyenne des hauteurs et des diamètres de <i>Liquidambar</i> à Mandraka suivant les provenances, les blocs et leurs interactions .....	40
Tableau 6: Caractéristiques dendrométriques de Liquidambar dans les zones d’introductions à Madagascar.....	42

Tableau 7 : Comparaison de la croissance de Liquidambar du verger de Mandraka avec quelques espèces introduites courantes dans les mêmes conditions écologiques à Madagascar.....	43
Tableau 8: comparaison de la croissance de <i>Liquidambar</i> à Mandraka par rapport aux autres essais de provenance du CFI .....	45
Tableau 9: Caractéristiques des provenances considérées et du site d'essai.....	50
Tableau 10 : constitution et conditions de substrat d'essai de germination .....	52
Tableau 11 : Tableau d'analyse de variances .....	56
Tableau 12: Rendement en graines par fruit de Liquidambar et poids de 1000 graines .....	58
Tableau 13 : Taux de germination de Liquidambar .....	59
Tableau 14 : Variabilité de la vitesse et du taux de germination des graines de Liquidambar de Mandraka.....	60
Tableau 15 : variabilité et héritabilité de la croissance juvénile des descendants du Liquidambar de Mandraka .....	63
Tableau 16: Taux de survie et croissance des jeunes plants de Liquidambar en pépinière .....	63
Tableau 17 : Matrice de corrélation entre les valeurs des parents-descendants.....	66
Tableau 18 : Récapitulatif des propriétés du bois de Liquidambar considérées dans cette étude .....	76
Tableau 19 : Propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar de Mandraka .....	78
Tableau 20 : Comparaison des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar de Mandraka par rapport à celles rapportées par les autres auteurs.....	79
Tableau 21 : Quantité d'extractibles de quelques essences par rapport à celle de <i>Liquidambar styraciflua</i> .....	80
Tableau 22: perte de masse du bois de Liquidambar .....	82
Tableau 23 : Matrice de corrélation entre les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar .....	83
Tableau 24 : Caractéristiques du dispositif ultrasonore et qualité du signal .....	99
Tableau 25 : Incertitude de mesure .....	100
Tableau 26 : Comparaison des moyennes des valeurs de Module d'élasticité estimé par BING et par UScan .....	101
Tableau 27 : Différence de valeur d'estimation du module d'élasticité.....	103
Tableau 28 : Modèles de prédiction par SPIR des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar .....	104
Tableau 29 : Quelques modèles de prédiction des propriétés du bois par SPIR .....	106



Tableau 30 : Propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar prédites par SPIR, prédites par ultrason et mesurées par les méthodes normalisées .....	107
Tableau 31 : valeurs du module d'élasticité prédit par SPIR et estimé par UScan sur les carottes .....	108
Tableau 32 : Tableau d'analyse de variances .....	114
Tableau 33 : Variabilité inter arbre des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar .....	120

# **INTRODUCTION**

## 1- Le bois, un matériau incontournable

Le plus grand défi auquel l'humanité est confrontée est de nourrir et protéger plus de 6 milliards d'individus actuellement. La réussite de ce challenge passe par l'adéquation entre agriculture, matières premières/industrie et environnement. Dans ce contexte, la forêt joue un rôle majeur en tant qu'élément régulateur de l'environnement et fournisseur de matière première et d'énergie. Les 4 milliards d'hectares (Md ha) de forêts dans le monde (31% de la surface des terres immergées) dont 1,18 Md ha à vocation d'exploitation, ont produit 3,6 milliards de m<sup>3</sup> (Md m<sup>3</sup>) de bois (FAO, 2006). Les activités humaines consomment annuellement 4 Md m<sup>3</sup> de bois dont 1,85 Md m<sup>3</sup> en combustible, bois de chauffe et bois d'énergie, 1,65 Md m<sup>3</sup> en tant que bois rond à usage industriel (tous bois ronds, hors bois de chauffage) et 0,4 Md m<sup>3</sup> en tant que bois de sciage. Il manquait ainsi entre 2000 et 2010, 0,55 Md m<sup>3</sup> de bois par an, ce qui, en termes de surface correspond à 130 millions d'hectare (M ha) de forêt. A défaut, la quantité de bois manquante est bien souvent extraite des forêts à vocation de conservation ou protection (FAO, 2012).

La perte en superficie forestière est surtout observée dans les régions tropicales et en Afrique : à ce titre, entre 2000 et 2005, 4 M ha de surface forestière ont été perdus en Afrique (FAO, 2011). Sur le continent Africain, les 210 M ha de forêts à vocation d'exploitation produisent 589 M m<sup>3</sup> de bois de feu, 78 M m<sup>3</sup> de bois rond à usage industriel dont 9 M m<sup>3</sup> de bois de trituration et 8,3 M m<sup>3</sup> de bois de sciage; soit au total 675 M m<sup>3</sup> alors que la demande est estimée à 750 M m<sup>3</sup> de bois (FAO, 2011). Ainsi, à minima, il manque en Afrique 75 M m<sup>3</sup> de bois par an.

A Madagascar, les forêts à vocation d'exploitation produisent 18,5 M m<sup>3</sup> de bois par an dont 75 % proviennent des forêts naturelles et 25 % des plantations (Meyer et al, 2006). Les demandes en bois du marché local sont, quant à elles, estimées à 21,7 M m<sup>3</sup> par an dont 9,02 M m<sup>3</sup> pour le bois de feu (41%), 8,58 M m<sup>3</sup> pour le charbon (39%) et 4,12 M m<sup>3</sup> pour le bois de construction, bois d'œuvre et de services (20%) (Meyer et al, 2009). On enregistre ainsi un déficit de 3,20 M m<sup>3</sup> de bois par an que les formations forestières naturelles supportent afin de subvenir aux besoins des populations malgaches.

Les forêts de plantation malgaches, bien que leur superficie soit passée de 272 000 à 415 000 ha entre 1990 et 2000, offrent peu de choix d'essences aux consommateurs locaux. En effet, la plupart des produits forestiers de plantation commercialisée dans les marchés locaux malgaches sont dominés par les espèces du genre *Pinus* (120 000 ha) et *Eucalyptus* (147 000 ha). Les plantations restantes, composées d'*Acacia*, d'*Anacardium* et de *Fraxinus* ne sont pas encore en phase d'exploitation (Département des Recherches Forestières et Piscicoles, 1996).

Pour répondre aux demandes croissantes en produits ligneux, il pourrait être envisagé de (1) diversifier les essences de reboisement, (2) produire plus de bois et/ou (3) optimiser son utilisation afin de réaliser des économies en produits ligneux et d'éviter ainsi la pression grandissante sur les forêts naturelles. Afin d'atteindre ces défis, il est important de maîtriser les techniques de plantation, de conduite sylvicole, d'exploitation, de transformation ainsi que l'amélioration des arbres pour la croissance et la qualité du bois. Pour ce qui est du bois en particulier, la considération des propriétés intrinsèques du matériau est capitale car elle permet de cibler et/ou d'orienter l'utilisation future de la forêt. Dans cette stratégie, tous programmes de plantations, d'amélioration génétique associée aux techniques sylvicoles devraient donc prendre en compte les propriétés intrinsèques du bois (Trouy-Triboulot & Triboulot, 2001).

En plus des espèces classiques de reboisement à Madagascar, certaines essences de feuillus américains présentent un intérêt pour la grande île : c'est le cas du Liquidambar (*Liquidambar styraciflua* L.). Comme beaucoup de feuillus américains (caryer, tulipier de Virginie...), le Liquidambar peut être intéressant pour le marché malgache du fait de ses caractéristiques technologiques, de sa teinte, de ses contrastes aubier/duramen (American Hardwood Export Council, 2008). Son plus grand défaut est son fort retrait. Cependant, aux Etats-Unis, des techniques de séchage permettent désormais d'obtenir du bois de Liquidambar permettant de réaliser de nouveaux designs surtout en ameublement et pour l'agencement intérieur (Sabistina, 2010).

Trente pour cent des stocks de feuillus de la partie sud des USA sont constitués de *Liquidambar styraciflua* L. ou copalme d'Amérique (Carter & Hughes, 1984). Le bois de cette espèce, grâce à ses propriétés physico-mécaniques, connaît un succès sur le marché américain mais aussi sur le marché européen pour la fabrication de panneaux, palettes ou l'ameublement étant donné ses aptitudes à recevoir teintures et finition (American Hardwood Export Council, 2008 et 2009 ; Sabistina, 2010). La réussite de cette essence s'explique par sa grande plasticité. En effet, le copalme d'Amérique possède une forte potentialité d'adaptation à différents types de conditions environnementales et elle peut se gérer en taillis à partir des

rejets de souches (Colonado, 1992). De plus, cette essence a une croissance rapide et une grande faculté à recoloniser les terrains en friches (Sabistina, 2010). Enfin, elle se multiplie facilement en pépinière, grâce à sa production abondante en graines qui se conservent bien et qui ont un taux élevé de germination (Bonner, 1970). Sur la base de ces potentialités, les forestiers américains ont démarré, depuis les années 1960, des programmes d'amélioration génétique et sylvicole de cette essence (Wright & Cunningham, 2008).

A Madagascar depuis les années 1970, l'amélioration génétique des espèces forestières s'est axée principalement sur une liste d'espèces exotiques adaptées aux diverses conditions du milieu malgache (*Pinus kesiya*, *Pinus elliottii*, *Pinus patula*, *Pinus caribea*, *Pinus oocarpa*, *Eucalyptus robusta* et *Eucalyptus grandis*) (Ramamonjisoa et al, 2003). Il s'agissait de sélectionner les meilleures provenances suivant la vigueur et la forme de l'arbre, de sélectionner les meilleurs individus dans ces provenances et d'installer des vergers à graines (Département des Recherches Forestières et Piscicoles, 1996). L'objectif était avant tout d'offrir un choix d'espèces à croissance rapide, à usages multiples, de grande plasticité et relativement résistantes au passage du feu (Chaix & Ramamonjisoa, 2001). Jusqu'à l'heure actuelle, les propriétés technologiques, paramètres incontournables de l'utilisation future du bois, n'ont jamais été prises en compte dans les programmes d'amélioration génétique et sylvicole des essences forestières exotiques introduites à Madagascar.

Parmi les nombreux essais de provenances d'espèces forestières, il existe un essai de Liquidambar, suivi depuis 25 ans par la recherche forestière malgache. Cet essai a été planté à Mandraka par le Département des Recherches Forestières et Piscicoles malgache (DRFP) en 1986 lors de l'essai international de provenances multisites promu par le Commonwealth Forestry Institute d'Oxford. Cette plantation n'a pas encore fait d'objet d'une synthèse que ce soit sur l'adaptation et la croissance de l'espèce, sur la germination des graines et la multiplication ou sur les propriétés technologiques de son bois, exceptés les rapports de suivis annuels et ceux de Rakotondraoelina & Rakotovao (2005) et de Rakotovololonalimanana et al (2011).

Etant donné l'insuffisance de l'offre en bois du marché local malgache, la dégradation des surfaces forestières à Madagascar, et la large gamme d'utilisations du bois de Liquidambar, l'importance d'étudier les potentialités de cette espèce à Madagascar a justifié et généré ce présent travail de thèse. Ce travail, transversal et pionnier dans son genre, repose sur des études allant de la germination des graines de Liquidambar, passant par l'étude des caractères de croissance de l'espèce et de ses descendants jusqu'à la considération des propriétés physico-mécaniques de son bois. Dans ce travail de thèse, nous n'avons considéré que la finalité « bois matériau » pour la valorisation du Liquidambar, l'option « bois énergie/bois de feu » ne sera pas abordée. Ainsi, pour bien conduire ce travail, nous nous sommes posé différentes questions :

- 1) Dans quelles mesures les caractères de croissance, de multiplication et les propriétés du bois de *Liquidambar styraciflua* planté à Mandraka sont-elles variables ?
- 2) Peut-on les améliorer ?
- 3) Quelle stratégie d'amélioration peut-on entreprendre ?

## **2- Objectifs, questions et hypothèses de travail**

### 2-1- Objectifs de travail

Cette étude, se positionnant en amont de l'objectif final qui est d'améliorer le *Liquidambar styraciflua* pour une sylviculture et une utilisation de son bois adaptées au contexte malgache, va proposer une stratégie d'amélioration avec les recommandations nécessaires. Pour ce faire, nous nous sommes donné comme objectifs spécifiques :

- 1) D'étudier l'adaptation (croissance, forme, multiplication) du Liquidambar planté à Mandraka.
- 2) De décrire et d'expliquer la variabilité intraspécifique du Liquidambar sur ce site tant au niveau des caractères de croissance que des propriétés de son bois.
- 3) D'étudier les variabilités intra-arbres des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar.
- 4) D'établir des outils de prédiction des propriétés du bois de Liquidambar de la Mandraka
- 5) D'évaluer le contrôle génétique, les conséquences sur la sélection des corrélations entre les propriétés du bois avec les caractéristiques dendrométriques de l'arbre et de son environnement.

## 2-2-Questions de travail

Pour atteindre ces objectifs spécifiques, cette étude va devoir répondre aux questions suivantes :

- 1) Comment Liquidambar s'est-il adapté à Mandraka sur la base des données de croissance, de fructification, de multiplication ?
- 2) Existe-t-il des sources de variabilités au niveau des caractères de croissance et de multiplication de l'espèce ? Et comment les explique-t-on ?
- 3) Quelle est la variabilité des propriétés technologiques du bois de Liquidambar ? Et comment se situent-elles par rapport aux autres espèces utilisées à Madagascar ?
- 4) Que peut-on dire du contrôle génétique des caractéristiques dendrométriques, de la faculté de multiplication, de la croissance juvénile de Liquidambar et des propriétés de son bois ?
- 5) Quelles sont les recommandations pour améliorer le Liquidambar dans le contexte malgache ?

## 2-3-Hypothèses de travail

Ainsi, pour une bonne conduite de ce travail de thèse, nous avons avancé les cinq hypothèses suivantes :

- 1) La croissance du Liquidambar est meilleure à Madagascar (en l'occurrence à Mandraka), par rapport à d'autres espèces exotiques courantes à Madagascar et essais internationaux de provenances dans le monde.
- 2) L'espèce a une bonne faculté de multiplication (germination supérieur à 80%, taux de survie supérieur à 90%).
- 3) La combinaison des mesures de références de laboratoires avec la méthode vibratoire BING® (Beam Identification for Nondestructive Grading), la SPIR (Spectrométrie Proche Infra Rouge), et les ultra-sons permettent de caractériser indirectement certaines propriétés physico-mécaniques du bois sans avoir recours à des mesures destructives.
- 4) Les caractéristiques de croissance, la faculté de multiplication, la croissance juvénile de Liquidambar et les propriétés de son bois sont sous contrôle génétique.
- 5) Il existe des liens entre certaines propriétés du bois, les caractéristiques de croissance et l'environnement de l'arbre.

La suite de ce document va se subdiviser en quatre parties. La première partie présente l'état de l'art. Cette partie va traiter (1) de l'étude de la germination jusqu'à la caractérisation et l'amélioration du bois. (2) des généralités sur le Liquidambar et (3) une section décrivant la plantation de Liquidambar à Mandraka où les expérimentations ont été réalisées. Les démarches générales de cette thèse seront abordées dans la deuxième partie. Etant donné la diversité des expérimentations, nous avons décidé de traiter cette thèse sous forme de cinq (5) chapitres correspondant aux différents domaines abordés. Chaque chapitre comprendra une brève introduction, ainsi que son propre « matériels et méthodes » pour plus de clarté. Ainsi, ces 5 chapitres formeront la troisième partie de notre thèse qui est l'étude du Liquidambar. La quatrième partie de cet ouvrage portera sur la discussion générale de ce travail de thèse et les conclusions.



## **PARTIE I : REVUE DE LITTERATURE**

## I- ETUDE DE L'ARBRE ET DE SON BOIS

### 1-1- L'arbre et la formation du bois

Chaque être vivant, pour pouvoir pérenniser son espèce doit se multiplier. Pour les plantes, dont les arbres, la multiplication est possible par propagation des graines (production, dispersion et germination), ou, par multiplication végétative (rejet de souche, marcottage, ...). Nous nous intéresserons ici de la reproduction par voie générative de l'arbre.

La croissance de l'arbre est non seulement conditionnée par l'environnement, (sol, topographie, pluviométrie, température) mais l'origine et le patrimoine génétique entrent également en jeu. De plus, au cours de la vie des arbres, les fluctuations de ces paramètres externes en interaction avec le génome ont aussi des répercussions sur sa façon de croître. Tous ces éléments peuvent alors générer une grande variabilité dans le bois laquelle peut être observée à partir de ses propriétés mesurables (anatomique, physiques, mécaniques, chimiques, ...).

Pour les arbres, il existe deux grands types de croissance : dans le sens vertical, assurée par la croissance primaire du bourgeon terminal (Figure 1), et dans le sens radial (Figure 2) par la croissance secondaire du cambium. Cette dernière s'effectue à partir de l'activité des cellules cambiales qui sur la partie interne vont donner du bois, et, sur la partie externe du liber (Figure 2) (Dinh, 2011).

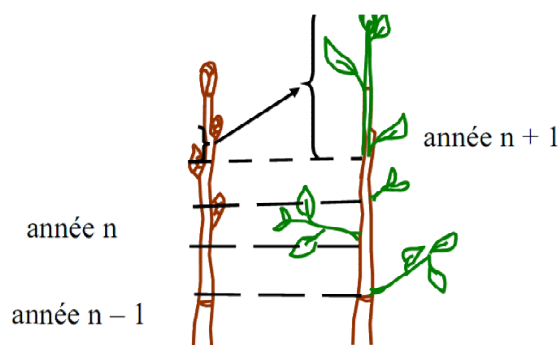


Figure 1 : Croissance verticale de l'arbre

(Source : Centre Régional de la Propriété Forestière-Limousin, 2009)

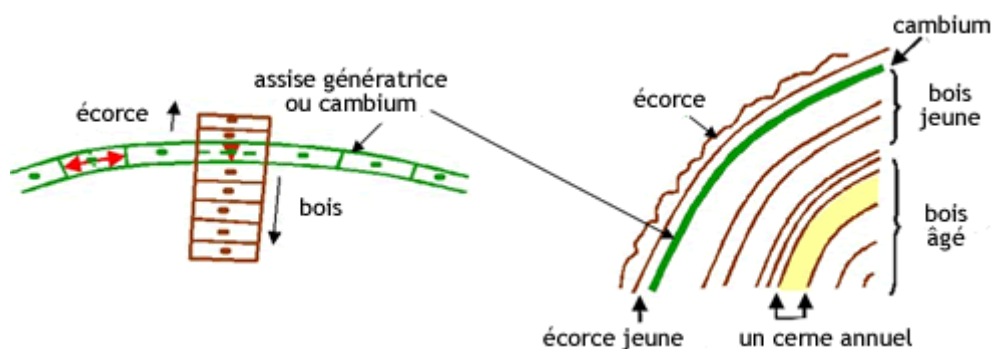


Figure 2 : Croissance radiale d'un arbre et différentes parties d'un bois  
(Source : Centre Régional de la Propriété Forestière-Limousin, 2009)

Grâce à ces deux types de croissance, le bois, présente un plan ligneux en 3 directions bien distinctes (Figure 3) : (1) la direction axiale ou longitudinale : celle du fil du bois ; (2) la direction radiale et (3) la direction tangentielle.

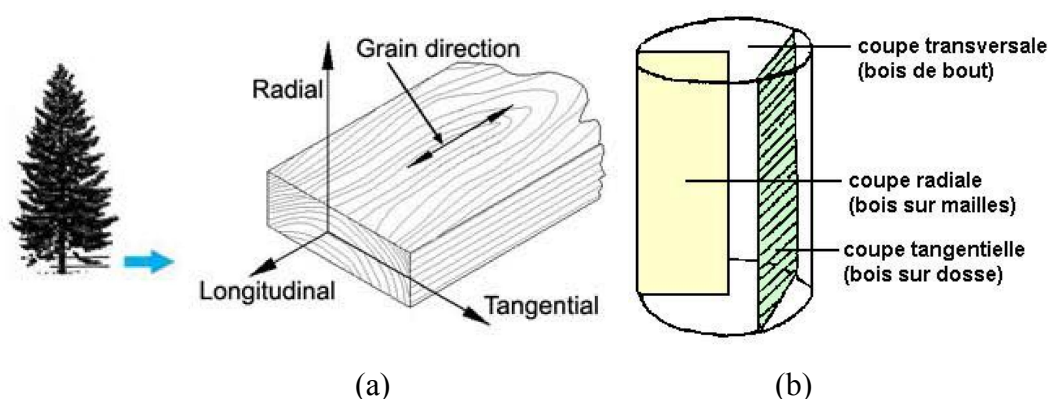


Figure 3: (a) : 3 axes du plan ligneux (b) : différentes coupes de référence  
(Trouy-Triboulot & Triboulot, 2001).

Le plan ligneux avec son organisation en trois directions (Figure 3) fait du bois un matériau anisotrope dont les propriétés varient différemment suivant la direction que l'on considère.

## 1-2- Pourquoi et comment étudier l'arbre et la forêt ?

Les arbres, constitutifs de la forêt et fournisseur (entres autres) de bois, nécessitent pour être utilisés en plantation, d'être domestiqués, améliorés et recevoir des soins sylvicoles afin de satisfaire les besoins en qualité et en quantité auxquels ils sont destinés. Dans cette optique, les entretiens et la « domestication » de la forêt où l'arbre est l'acteur principal, requièrent la combinaison de plusieurs disciplines telles que physiologie, biologie, génétique, mécanique,

mathématiques,... (Fournier et *al*, 1991 ; Rondeux, 1993 ; Lamontagne & Brazeau, 1996 ; Bastien & Wilhelm, 2000). Afin d'atteindre les objectifs fixés d'une forêt, il est important de connaître le comportement de l'espèce sur laquelle on doit travailler. Il existe plusieurs approches d'étude de la forêt et de l'arbre allant de la multiplication jusqu'à la transformation du bois. Pour évaluer la multiplication et la croissance de l'arbre, plusieurs critères peuvent être considérés. Les plus utilisés en amélioration génétique sont la germination, le taux de survie, les accroissements en hauteur, en diamètre et en volume (Steiner et *al*, 1985 ; Corbineau et *al*, 1985 ; Moore & Lacey, 2009 ; Dlamini, 2010). Cependant ces paramètres peuvent varier d'une espèce à une autre, entre individus, au sein d'une provenance ...; d'où la notion de variabilité (environnementale et/ou génétique) des caractères de croissance et qualité que nous allons prendre en considération.

### **1-3- Variations génétique et environnementale des paramètres de multiplication et de croissance des arbres**

Quand les arbres d'une même essence proviennent de différents endroits et que leurs descendants sont ensuite plantés dans les mêmes conditions environnementales (climatiques, édaphiques, topographiques,...), il a toujours lieu de considérer l'effet provenance. Une provenance est un groupe d'individus provenant de plusieurs arbres-mères ayant une origine géographique commune (White et *al*, 2007). À partir de cette notion, il faut considérer la variabilité génotypique conduisant à l'héritabilité, indicateur important pour la réalisation des sélections. L'héritabilité est une donnée statistique évaluant la part des facteurs génétiques dans la probabilité d'apparition d'un phénotype donné au sein d'une population donnée. Elle exprime, la part de variance phénotypique relevant de la variance génotypique. L'héritabilité sert à quantifier la part des facteurs environnementaux (acquis) et des facteurs génétiques (innés) dans la constitution du phénotype d'une population (Falconer & Mackay, 2004)

L'effet provenance est d'autant plus marqué que les zones de ces provenances sont différentes et éloignées géographiquement. C'est, par exemple, le cas du Pin sylvestre dont l'aire naturelle va de l'Espagne aux pays scandinaves et qui connaît de grandes variations pour le froid, l'ensoleillement et le photopériodisme. Cependant, cela n'exclut pas que, même pour des zones restreintes, l'effet provenance puisse être appréhendé et avoir de l'importance à l'image du pin Laricio de Corse et de Calabre (Steinmetz, 1986).

Les différences de croissance et de multiplication observées dans différents environnements de plantation (variation intra et inter provenance) sont plus grandes que celles entre provenances dans un même lieu (variation micro-environnementale dans une plantation et de la variation inter provenance) (Namkoong et al, 1988; Morgenstern, 1996). Cependant, pour les espèces forestières, il est plus adéquat de réaliser des sélections au niveau provenance lorsque les conditions environnementales facilitent une croissance rapide de l'essence (Campbell & Sorensen, 1978). En effet, la variation génétique se traduit par une plus forte variation phénotypique dans les conditions environnementales les plus favorables. Dans le cas contraire, les provenances ne pourraient pas exprimer leur plein potentiel génétique ou s'exprimeraient différemment. Roman et al (1996) ont démontré qu'il existe plus de variation en hauteur et en quantité de biomasse au niveau provenance chez *Gliricidia sepium* traité avec des arrosages fréquents que dans les traitements avec un apport en eau limité. Des résultats similaires ont été observés par Montes et al (2003) et Weber & Montes (2005) sur *Calycophyllum spruceanum*. De plus, il est possible de choisir, à priori, l'environnement de plantation alors que l'effet provenance n'est prédictible qu'à posteriori. Dans notre étude, l'effet provenance vis-à-vis des caractères de croissance de l'essai de plantation à Mandraka, constitué de 12 provenances de *Liquidambar styraciflua* sera considéré.

#### **1-4- Pourquoi étudier le bois ?**

Le matériau bois présente des spécificités particulières par rapport aux autres matériaux industriels en raison de son origine biologique. Bien l'utiliser nécessite de connaître son élaboration (la vie de l'arbre dans la forêt), ses principales caractéristiques, sa constitution sur le plan macroscopique et microscopique, les singularités et les altérations qu'il peut comporter, sa constitution chimique, ... L'obtention de ces informations requiert de caractériser les propriétés du bois.

#### **1-5- Différentes approches de la caractérisation du bois**

Le bois peut être évalué selon plusieurs critères (physique, chimique, mécanique, anatomique, ....). Il existe différents types de méthodes de caractérisation du bois selon l'objectif voulu et selon la zone géographique ou le pays. Cependant, il est possible de classer ces différentes méthodes en deux grands groupes à savoir : les méthodes standardisées ou normalisées qui sont dictées par des normes procédurales, et, les méthodes non standardisées qui peuvent être dérivées des normes ou développées spécifiquement. Dans chaque cas, il peut y avoir deux types d'approche à savoir les méthodes qui nécessitent la

destruction du matériau pour pouvoir obtenir des données et les autres, non destructives c'est-à-dire non invasives.

L'avantage des méthodes standardisées ou normalisées est qu'elles sont reproductibles, permettant ainsi la possibilité de réaliser des comparaisons. Cependant, les méthodes standardisées requièrent habituellement un large échantillonnage, et restent souvent destructives des échantillons.

Dans la typologie des méthodes non standardisées de caractérisation des propriétés mécaniques (en particulier, le module d'élasticité) du bois, il existe une panoplie d'approches basées pour la plupart sur des méthodes acoustiques et vibratoires (Haines *et al*, 1996 ; Sandoz *et al*, 2000 ; Teixeira & Moslemi, 2001 ; Beall, 2002 ; Brancheriau & Baillères, 2002 ; Brancheriau *et al*, 2002 ; Lin *et al*, 2007).

Pour l'évaluation non invasive des propriétés chimiques, l'humidité dans le bois, il y a la spectrométrie (infra rouge, proche infra-rouge, UV) (Kelley *et al*, 2004 ; Jones *et al*, 2006 ; Andrade *et al*, 2010). Pour les autres types de propriétés contrôlées ou corrélées à celles de la chimie, plusieurs auteurs ont montré les potentialités de la spectrométrie proche infrarouge pour la prédiction de propriétés physico-mécaniques et anatomiques du bois comme le module d'élasticité, l'angle des microfibrilles, les retraits, ... sur différentes espèces forestières (Meder *et al*, 1999 ; Fujimoto *et al*, 2008 ; Hein *et al*, 2009 ; Chaix *et al*, 2010).

Cependant, tout comme pour les méthodes standardisées, il y a lieu d'évaluer la précision, répétabilité et reproductibilité de ces prédictions. Une fois les méthodes validées, l'approche non destructive est plus rapide à réaliser, permettant ainsi de considérer un plus grand nombre d'échantillons. Dans la suite de notre étude, nous allons utiliser des méthodes standardisées et des méthodes non destructives pour déterminer les propriétés physico-mécaniques de notre matériel d'étude.

Etant donné la croissance à la fois longitudinale et radiale des arbres, il est important de considérer les propriétés du bois selon ces deux directions. De plus, l'espèce, l'origine géographique, l'environnement, la descendance et la provenance ont des impacts sur les propriétés du bois. C'est ce qui nous amène à aborder la variabilité des propriétés du bois.

### **1-6- Variabilité radiale des propriétés du bois**

Les propriétés physico-mécaniques, anatomiques et chimiques du bois varient de la moelle à l'écorce mais aussi de la base au sommet du tronc ainsi que dans les branches à cause de la croissance radiale du bois dans l'arbre, des contraintes à l'intérieur du tronc pour maintenir sa stabilité et des contraintes extérieures (inclinaison du sol, vents dominants). Cette

variabilité, affectant les caractéristiques du bois, mérite d'être connue et prise en compte lors de son exploitation. Cependant, dans chaque espèce, même d'un individu à un autre, la variation d'une propriété donnée n'est pas la même et ne peut pas être généralisée pour l'ensemble des arbres. Par exemple, Wienmann & Williamson (1987) ont démontré sur *Hampea appendiculata*, *Heliocarpus appendiculatus* et *Ochroma pyramidale*, que l'infradensité augmente de façon linéaire de la moelle à l'écorce mais l'amplitude varie d'une espèce à une autre ; alors que Knapic et al (2007) ont mis en évidence que la densité diminue de la moelle à l'écorce sur du Chêne. Pour le cas de l'angle de microfibrilles, Hein (2011) a démontré que ce paramètre diminue de la moelle à l'écorce mais l'allure et le comportement de cette variation ne sont pas les mêmes d'un individu à un autre. Pour le cas du module d'élasticité, Baillères et al (2005) ont mis en évidence son augmentation de la moelle à l'écorce sur des hybrides d'*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Ce qui justifie encore l'importance de l'étude de la variabilité radiale intra et inter-individus des propriétés du bois d'une espèce à une autre.

#### **1-7- Effet de la provenance, de l'environnement et de leurs interaction sur les propriétés du bois**

Comme évoqué précédemment, la variabilité qui est une des caractéristiques essentielles du monde vivant, est particulièrement marquée chez les espèces forestières (Steinmetz, 1986). Tout comme les caractéristiques de croissance, les propriétés du bois sont aussi influencées par l'environnement et la provenance de la plante. Si l'on considère les propriétés physico-mécaniques de base, il y a des espèces qui réagissent plus fortement à l'environnement que d'autres. Il en est de même pour l'effet provenance. D'autre part, certaines propriétés du bois sont influencées par l'interaction environnement x provenance. Ainsi, Miranda et al (2001) ont démontré que la densité d'*Eucalyptus globulus* n'était pas affectée par la variation du site mais diffère d'une provenance à une autre. Yang et al (2002) ont démontré, sur la même espèce, que les retraits (radial et tangentiel) étaient influencés par le site mais non la provenance. De plus, Yang et al (2002) ont mis en évidence sur *Eucalyptus globulus* que les retraits de cette espèce à 10 ans étaient moins élevés qu'à 17 et 23 ans. L'âge affecte donc les valeurs des propriétés du bois. Toujours à propos d'*Eucalyptus globulus*, mais sur d'autres sites de plantation, Miranda & Pereira (2002) ont démontré que la provenance et le site n'avaient pas influencé significativement la densité du bois. En revanche, provenance et site étaient des facteurs significatifs de la variation de la longueur des fibres, de l'épaisseur de la

paroi et du diamètre du lumen des fibres. L'effet site est donc important à connaître car la même espèce ne réagit pas de la même façon dans chaque site.

L'effet de l'interaction provenance x environnement est similaire à l'effet d'interaction génotype x environnement (Kremer, 1986 ; White et *al*, 2007) dès lors que les provenances ne se comportent pas de la même façon sur différents sites ou conditions environnementales. L'effet du site peut être appréhendé dans le cas d'un essai réalisé en serre (ou en milieu contrôlé) ou sur des localités dont les conditions extérieures varient (essai au champ). Il existe 3 grands types d'effet d'interaction génotype x environnement (Kremer, 1986) :

- Cas 1 : la provenance B est supérieure à la provenance A dans les environnements 1 et 2 et la supériorité est du même ordre dans les deux cas ; c'est-à-dire que les provenances ont réagi de la même façon dans les deux milieux (Figure 4).
- Cas 2 : la provenance B est supérieure à la provenance A dans les deux environnements avec une différence plus importante dans l'environnement 2 (Figure 5).
- Cas 3 : le classement des provenances est différent dans les deux environnements c'est-à-dire qu'il y avait une différente réaction des provenances vis-à-vis de l'environnement (Figure 6).

Selon les 3 cas, Kremer (1986) a évoqué qu'au sens statistique, les cas 2 et 3 correspondent à des situations d'interactions génotype x environnement mais seule la sélection au niveau du cas 3 est préoccupante ou délicate. Pour illustration, l'infradensité, la densité ou les propriétés chimiques du bois peuvent être influencées par l'interaction génotype x environnement (Lima et *al*, 2000 ; Osorio et *al*, 2000 ; Sykes et *al*, 2006).

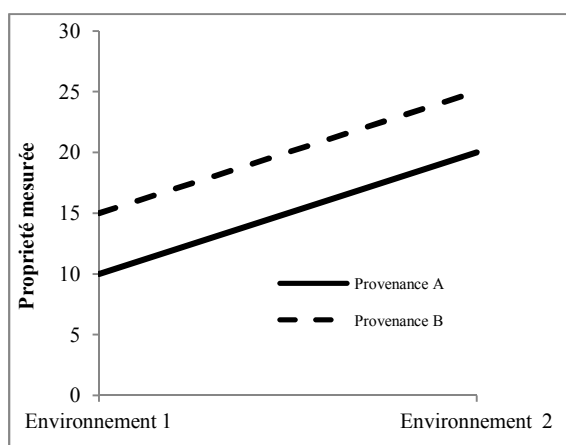


Figure 4 : Effet génotype x environnement, Cas 1 (Kremer, 1986)

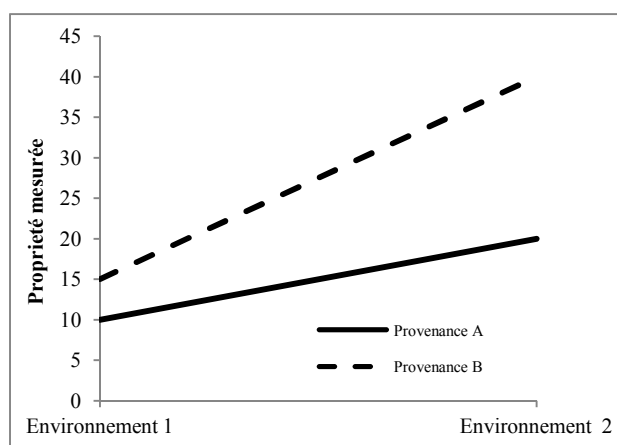


Figure 5 : Effet génotype x environnement, Cas 2 (Kremer, 1986)



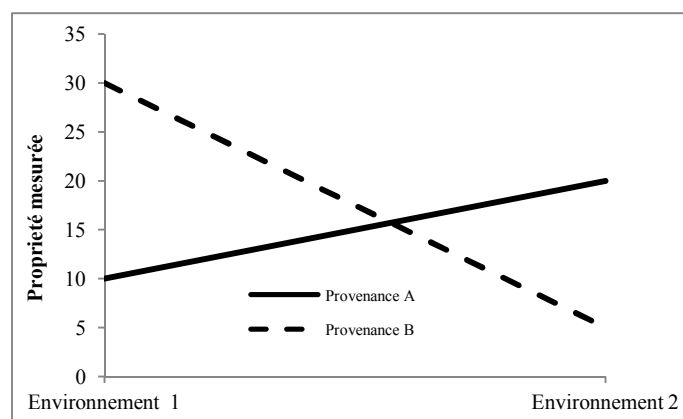


Figure 6 : Effet génotype x environnement, Cas 3 (Kremer, 1986)

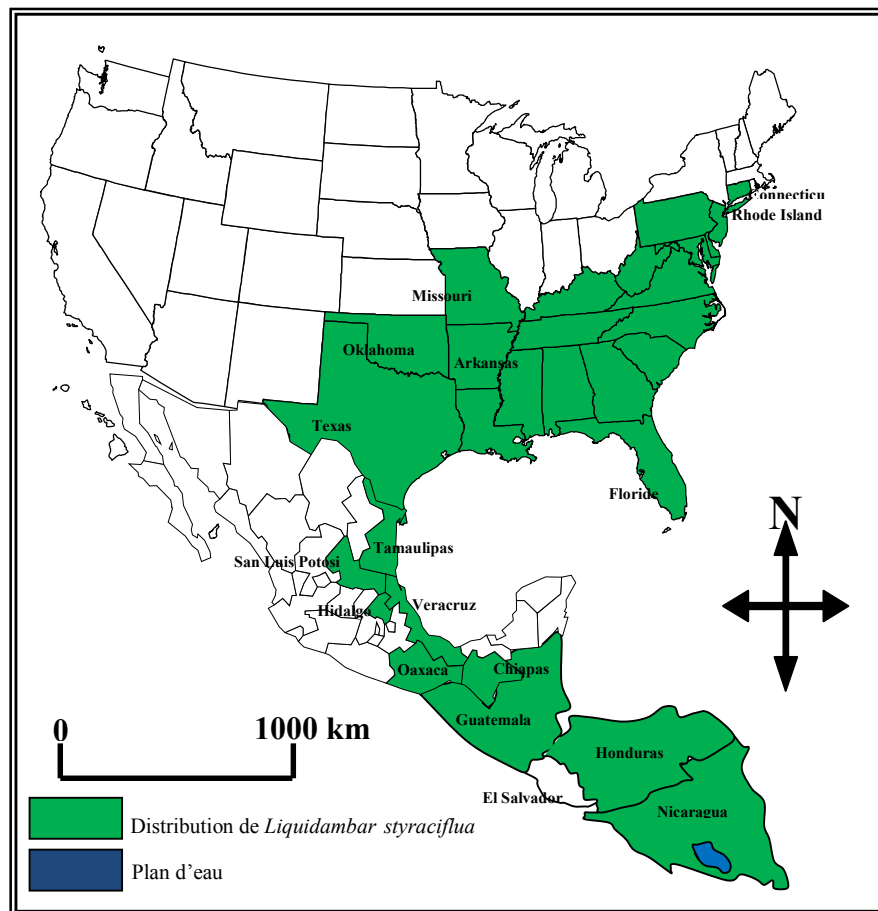
Les notions qui viennent d'être décrites seront utilisées dans le cas spécifique de notre étude sur le *Liquidambar* planté à Mandraka.

## II- GENERALITES SUR *LIQUIDAMBAR STYRACIFLUA* L.

### 2-1- Ecologie de *Liquidambar styraciflua*

*Liquidambar styraciflua* L. est un feuillu de la famille des *Altingiaceae*. Il est originaire de l'Est des Etats-Unis, du Mexique et d'Amérique centrale (Carte 1). Aux Etats-Unis, cette essence a une très grande distribution qui s'étale du Nord (Connecticut, latitude 41°N) vers le Sud jusqu'au centre de la Floride, et de l'Ouest du Texas vers l'Est jusqu'au Missouri, Arkansas et Oklahoma. Il y a un écart d'environ 800 km entre l'endroit le plus au Nord des Etats-Unis et celui de l'extrême sud au Mexique (Etat de Tamaulipas) où cette essence est présente. Au Mexique, elle se trouve en assez petites populations isolées le long de la Sierra Madre orientale à travers les Etats de San Luis Potosi, Hidalgo, Veracruz, Oaxaca et Chiapas. La répartition de l'espèce se poursuit au Guatemala et Honduras pour atteindre sa limite sud qui se trouve vers le centre du Nicaragua (latitude 13°N) (Carter & Hugues, 1984).

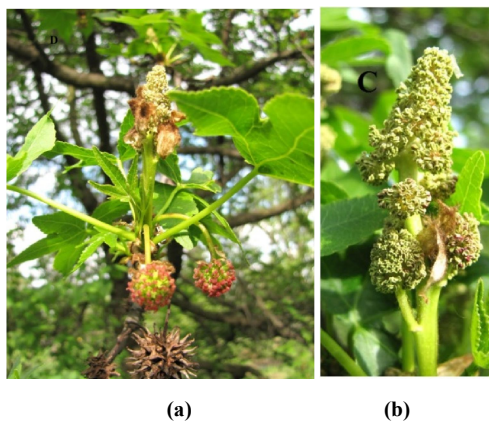
Dans son aire naturelle de distribution, la pluviométrie annuelle varie de 1500 à 1800 mm par an. La température moyenne est comprise entre 13,6 et 21,4°C. Le gradient altitudinal de prédilection de l'essence se situe entre 900 et 1600 m d'altitude et les valeurs extrêmes sont 650 et 2000 m (Orwa et al, 2009). La plante préfère un sol forestier acide humide bien drainé, de l'argile alluviale ou des sols limoneux des bords des rivières. Toutefois, elle est tolérante à une large gamme de conditions de sites et semble subsister à une période sèche ne dépassant pas 6 mois. L'espèce se trouve généralement et dans la plupart des endroits associée avec du pin et du chêne ou dans des forêts de transitions (Orwa et al, 2009).



Carte 1 : Aire naturelle de distribution de *Liquidambar styraciflua* L.

## 2-2- Biologie de reproduction de *Liquidambar styraciflua*

La période de floraison de *Liquidambar styraciflua* dans son aire naturelle de distribution se situe entre mars et mai et la maturation des fruits entre septembre et novembre. Les fleurs sont unisexuées et monoïques. Les fleurs femelles sont portées en positions axillaires des feuilles. Les mâles ont une inflorescence en chaton pendant (Photographie 1).



Photographie 1: inflorescences de *Liquidambar styraciflua*  
 (a) : inflorescence mâle en chaton et inflorescence femelle et graines de *Liquidambar*  
 (b) : inflorescence mâle de *Liquidambar*  
 (Source : Sophie, 2010)

Les fleurs femelles deviennent réceptives 7 jours après l'émergence des bourgeons mais le pic se situe 1 à 2 semaines après (c'est-à-dire 2 à 3 semaines après l'émergence du bourgeon floral) (Photographie 2) (Pamela et *al*, 2011). La durée maximale de disponibilité en pollens pour *Liquidambar styraciflua* est de 14 jours. La distance maximale de dispersion des pollens est de 183 m à partir du pied de l'arbre mais en moyenne, les pollens d'un pied de *Liquidambar* peuvent féconder des fleurs sur un rayon de 60 m. La réceptivité des fleurs est plus avancée au Sud qu'au Nord. En d'autres termes, elle varie en fonction de la latitude (Pamela et *al*, 2011). En termes d'illustration, les fleurs de *Liquidambar* d'Idabel (Oklahoma, USA, 33°53'44''N, -94°49'34''O) sont réceptives une semaine plus tôt que celles de Stillwater (Oklahoma, USA, 36°07'18''N, -97°04'07''O) (Pamela et *al*, 2011). Ces deux localités sont distantes de 2° de latitude ou 250 km du Nord au Sud. A cause de la différence de réceptivité des fleurs suivant la latitude, la maturation des fruits de *Liquidambar* se trouve aussi influencée par la latitude. Ainsi, les fruits des arbres les plus au sud murissent plus tôt. Dans la même étude, il a été montré qu'une auto-pollinisation des fleurs de *Liquidambar* est presque impossible. Les fruits et les graines sont généralement issus d'une fécondation croisée. Un fruit est considéré comme mûr lorsque sa couleur vert brillant devient vert jaunâtre ou même jaune (Photographie 3).



4/1/2008 A et B : fleurs femelles au commencement de l'émergence du bourgeon floral

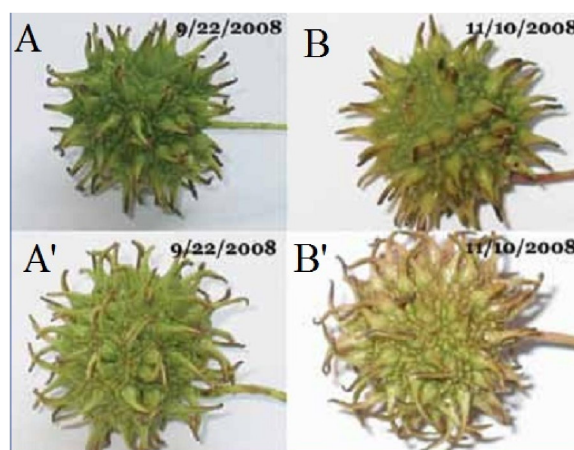
4/7/2008 A et B : les mêmes fleurs 7 jours après (commencement de la réceptivité)

4/22/2008 A et B : les mêmes fleurs 21 jours après (pic de la réceptivité)

4/30/2008 A et B : la même fleur 29 jours après (fin de la réceptivité)

Photographie 2: Fleur de *Liquidambar styraciflua* à différents stades de réceptivité  
(Pamela et al, 2011)

L'arbre peut produire des fruits avec des graines viables à chaque saison de fructification à partir de 20 à 30 ans jusqu'à au moins 150 ans (Kormanik, 1990). Les fruits correspondent à des têtes globuleuses de 22 à 35 mm de diamètre avec de multiples petites capsules bicellulaires. Malgré l'annualité de la fructification, il existe un pic de production de fruits qui se répète tous les 3 à 4 ans.



9/22/2008 A et 11/10/2008 B : fruits au début de la maturité

9/22/2008 A' et 11/10/2008 B' : fruits en pleines maturité

Photographie 3: fruits de *Liquidambar styraciflua* à différents stades de maturité  
(Pamela et al, 2011)

A Madagascar, la maturation des fruits peut s'étaler de fin avril jusqu'en octobre mais elle est effective à partir de mai à juin. En outre, suivant la pluviométrie annuelle, ces périodes peuvent se décaler et la récolte peut être bonne ou mauvaise (Rakotondraolina & Rakotavao, 2005). Cette période coïncide avec celle de la floraison de l'arbre dans son aire

naturelle. Toutefois lors d'une de nos collectes de matériel végétal (décembre 2011), des graines à l'état vert ont encore été trouvées sur le sol. Une étude phénologique de *Liquidambar* à Madagascar n'a pas encore été réalisée et mérite d'être prise en compte dans une étude complémentaire.

### 2-3- Morphologie de *Liquidambar styraciflua*

Au stade juvénile, cette espèce présente une cime conique, régulière et possède un port de type fastigié (Photographie 4). Au stade adulte, la cime est élargie et aplanie. L'essence a un fût droit présentant une écorce grise-brune profondément fissurée. Les feuilles sont caduques et lobées (10 à 15 cm de long). Les bords des feuilles sont dentés et la nervation est palmée (Photographie 5). La face supérieure des feuilles est d'un vert foncé brillant et celle inférieure plus claire. Elles possèdent un long pétiole qui ressemble à celui du platane, espèce plus commune en Europe. Les feuilles rougissent en automne (mois de Mai à Août à Madagascar) avant de tomber. Cette caractéristique, que l'on ne retrouve pas sur les arbres autochtones malgaches, rend cette essence esthétiquement attractive, lui donnant un intérêt ornemental (Photographie 6). La chute des feuilles dures environ entre 2 à 3 mois et elles réapparaissent en octobre.



Photographie 4 : Plant de *Liquidambar styraciflua* de 3 ans utilisé comme ornementation dans la ville d'Antananarivo  
(Source : Herizo Rakotovololonalimanana)



Photographie 5 : Feuille à cinq lobes de *Liquidambar styraciflua* de l'arboretum d'Ambatobe  
Source : Herizo Rakotovololonalimanana)



Photographie 6: Essai de provenances de *Liquidambar styraciflua* âgé de 22 ans à Mandraka  
(Source : Herizo Rakotovololonalimanana)

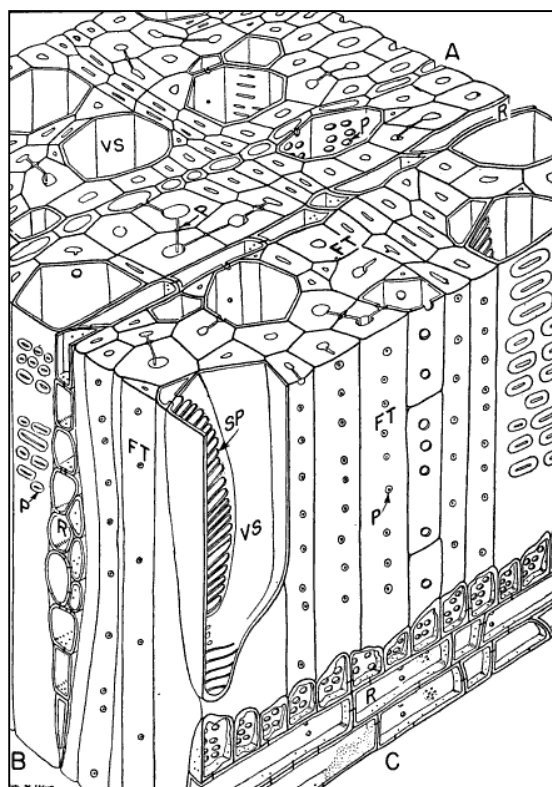
## **2-4- Atouts et faiblesses de l'arbre sur pied**

Le Liquidambar est une espèce à croissance rapide pouvant atteindre 45 m de hauteur et plus d'un mètre en diamètre. Il est capable de coloniser rapidement des parcelles d'éclaircies et rejette (Orwa et *al*, 2009). Son tronc est droit et peut dépasser les 25 m de hauteur avant les premières grosses branches (Sabistina, 2010). C'est un arbre qui a une durée de vie longue avec des sujets atteignant les 200 ans (Orwa et *al*, 2009). Sur pied, l'essence est très sensible au feu et résistante aux insectes et aux pathogènes sauf à la chenille *Malacosoma disstria*, dangereux défoliateur du Liquidambar (Rakotondraoelina & Rakotovao, 2005). Les arbres morts ou blessés sont sujets aux attaques d'insectes tout particulièrement les scolytes (*Platypus compositus*, *Dryocoetes betulae*, *Dryocoetes liquidambarus*, *Pityophthorus liquidambarus*) (Auberlinder, 1984). Il existe, par ailleurs, un grand nombre de champignons pouvant parasiter le bois sur pied blessé, le plus connu étant le chancre du tronc *Botryosphaeria ribis* et sa variété *chromagena* (Gilman & Watson, 1993).

## **2-5- Anatomie du bois de Liquidambar**

Le bois de liquidambar est homogène, à pores diffus, isolés ou accolés soit radialement soit en groupes d'environ 120 à 180/mm<sup>2</sup> répartis uniformément dans tout le cerne (Figure 9). Les rayons sont très fins et uniformes. Le parenchyme, rare, est à parois minces avec une disposition juxta-vasculaire ou dispersée. Les limites des cernes peuvent être visibles ou marquées par une ou deux assises discontinues de cellules parenchyme. Les vaisseaux ont une section polygonale à parois minces et possèdent des perforations scalariformes d'une dizaine de barreaux (Figure 7). Ils ont un diamètre assez petit (60 à 95 µ) et constant dans tout le cerne. Les ponctuations inter vasculaires sont très grandes, de forme elliptique, et disposées en rangé horizontale. Les rayons sont bi à trisériés avec une hauteur de 20 cellules en moyenne et parfois hétérogènes. Ils ont des parois moyennes à très épaisses, généralement ponctuées. Les fibres libriformes sont absentes chez le bois de liquidambar (Jacquiot et *al*, 1973) (Figure 8).





A : vue transversale  
B : vue tangentielle  
C : vue radiale  
FT : fibres des trachéides  
VS : segment de vaisseaux  
R : cellules des rayons  
SP : Plaques scalariformes  
P : porosité

Figure 8 : Anatomie du bois de Liquidambar

(Cowling, 1961)

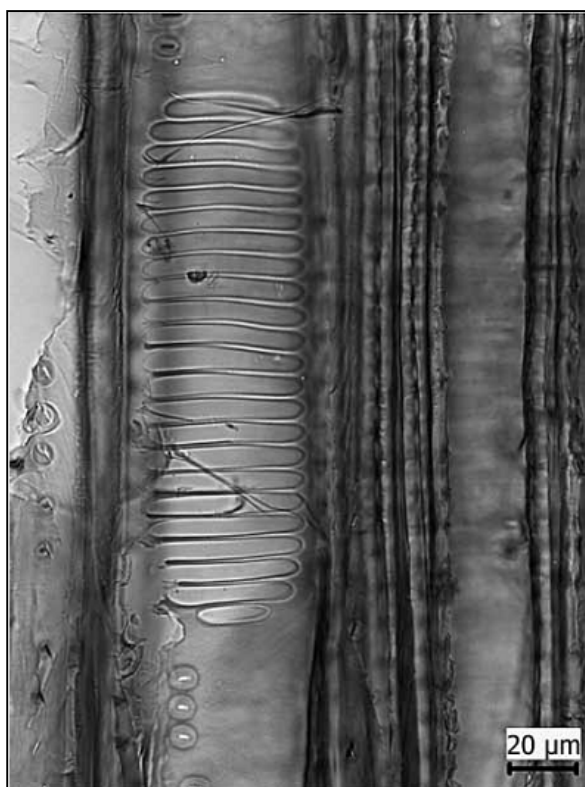


Figure 7 : Perforation de la plaque scalariforme du bois de Liquidambar (Akkemik & Yaman, 2012)

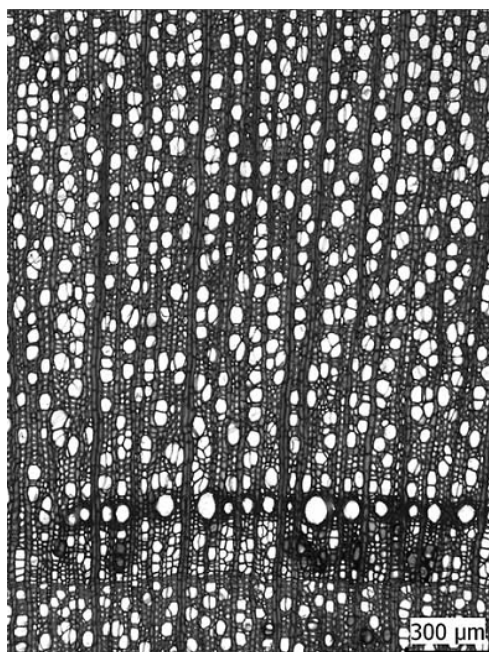


Figure 9 : Pores diffus du bois de Liquidambar (Akkemik & Yaman, 2012)

## 2-6- Utilisation du bois de cœur et de l'aubier de Liquidambar

Dans le passé, l'offre de bois de liquidambar d'Amérique était limitée parce que la filière maîtrisait mal son séchage industriel. En effet, les retraits de son bois sont importants, avec un retrait radial moyen de 5,4% et un retrait tangentiel moyen de 12,7% (Mattos et *al*, 2001). Aujourd'hui aux Etats-Unis, en maîtrisant les techniques de séchage en séchoir, on peut obtenir des produits finis sans déformations et de qualité acceptable. Le bois de liquidambar ne se fend pas facilement grâce à son grain très enchevêtré. Cette essence accepte bien les finitions (teinte peinture, vernis...) grâce à l'absence de résine dans son bois (American Hardwood Export Council, 2008).

Aux Etats-Unis, le bois de Liquidambar (« Sweetgum ») possède 2 appellations en fonction de son aspect: le « **sapgum** » et le « **redgum** » (Carter & Hugues, 1984). Le sapgum est le plus courant : aubier ou duramen, ses teintes varient du blanc cassé au blanc rosé et offre un grain maillé. Le redgum est plus difficile à trouver parce qu'il n'existe que dans le bois de cœur de vieux sujets. Ses teintes varient du rouge clair à un marron foncé intense avec des stries minérales qui mettent en valeur son caractère « exotique ». Le sapgum comme le redgum s'usinent facilement.

En Europe et aux Etats-Unis d'Amérique, le redgum est très recherché par le secteur du mobilier haut de gamme (Photographie 7), l'ébénisterie, les portes et les placages pour les panneaux d'agencement (Sabistina, 2010). Il est fréquemment employé en association avec le noyer et l'acajou. Des fabricants de panneaux de contreplaqué l'utilisent également pour l'habillage des panneaux décoratifs (Photographie 8).



Photographie 7 : Meuble de rangement en bois de Liquidambar  
(Source : American Hardwood Export Council, 2008)



Photographie 8 : Cuisine fabriquée avec du bois de Liquidambar utilisé en placage  
(Source : Daumal-cuisines.com)



Le sapgum est utilisé par les fabricants de contreplaqué pour les faces externes et les couches intermédiaires. Dans l'industrie du meuble et de l'ébénisterie, le sapgum est utilisé aussi bien pour les panneaux latéraux que les fonds et les tablettes ou cadre de miroir. Il est également employé pour une large gamme d'application en intérieur : placages, moulures, chevilles, portes d'armoires, bureau, stores, jouets, manches (Sabistina, 2010). Johnson (1985) a aussi rapporté son utilisation pour la fabrication des traverses des chemins de fer.

En Europe, le redgum et le sapgum, de par leurs qualités de finition, ont été employés par l'industrie du meuble qui a permis d'offrir une alternative au merisier et au noyer. Le bois de Liquidambar (sapgum et redgum) permet également d'habiller les systèmes hi-fi, les étagères pour téléviseur, les caissons de piano ou d'orgues. En effet, son bois offre une sonorité suave et sa qualité de finition permet de rivaliser avec des essences d'ébénisterie haut de gamme.

## 2-7- Caractéristiques technologiques et propriétés du bois de Liquidambar

Le Tableau 1 récapitule les caractéristiques technologiques du bois de *Liquidambar styraciflua* d'Amérique.

Tableau 1 : Caractéristiques physico-mécaniques du bois de *Liquidambar styraciflua* d'Amérique

Caractéristiques du bois de <i>Liquidambar styraciflua</i>	Valeur	Classe	Source
Densité	0,52/0,57	mi-lourd	Johnson, 1985 Faust et al, 1990 Alden, 1995 Mattos et al, 2001 American Hardwood Export Council, 2008
Dureté	2,4	mi-dur	
Rétractibilité volumétrique totale	19,5%	forte	
Coefficient de rétractibilité	0,56%	élevé	
Rétractibilité tangentielle	13%	élevé	
Rétractibilité radiale	7%	élevé	
Résistance à la compression axiale	49 Mpa	élevé	
Résistance à la flexion statique	162 Mpa	élevé	
Résistance à la flexion dynamique	0,32 MPa	moyenne	
Résistance à la rupture	35 - 50 MPa	moyenne	
Module d'Elasticité	11 000 MPa	moyenne	

A l'air libre, les débits en aubier (sapgum) se comportent bien avec seulement quelques risques de bleuissement si la circulation de l'air dans les piles n'est pas suffisante. Le redgum a, par contre, tendance à gercer et à se déformer (United States Department of Agriculture, 1987). Le séchage artificiel doit être conduit avec précautions en commençant à température relativement basse (50°C au thermomètre sec) et assez forte hygrométrie (85%) pour terminer vers 75°C et 40% de tension de vapeur d'eau (United States Department of Agriculture, 1987). Pour finir, le bois de liquidambar est peu durable et moyennement imprégnable (Alden, 1995 ; American Hardwood Export Council, 2008).

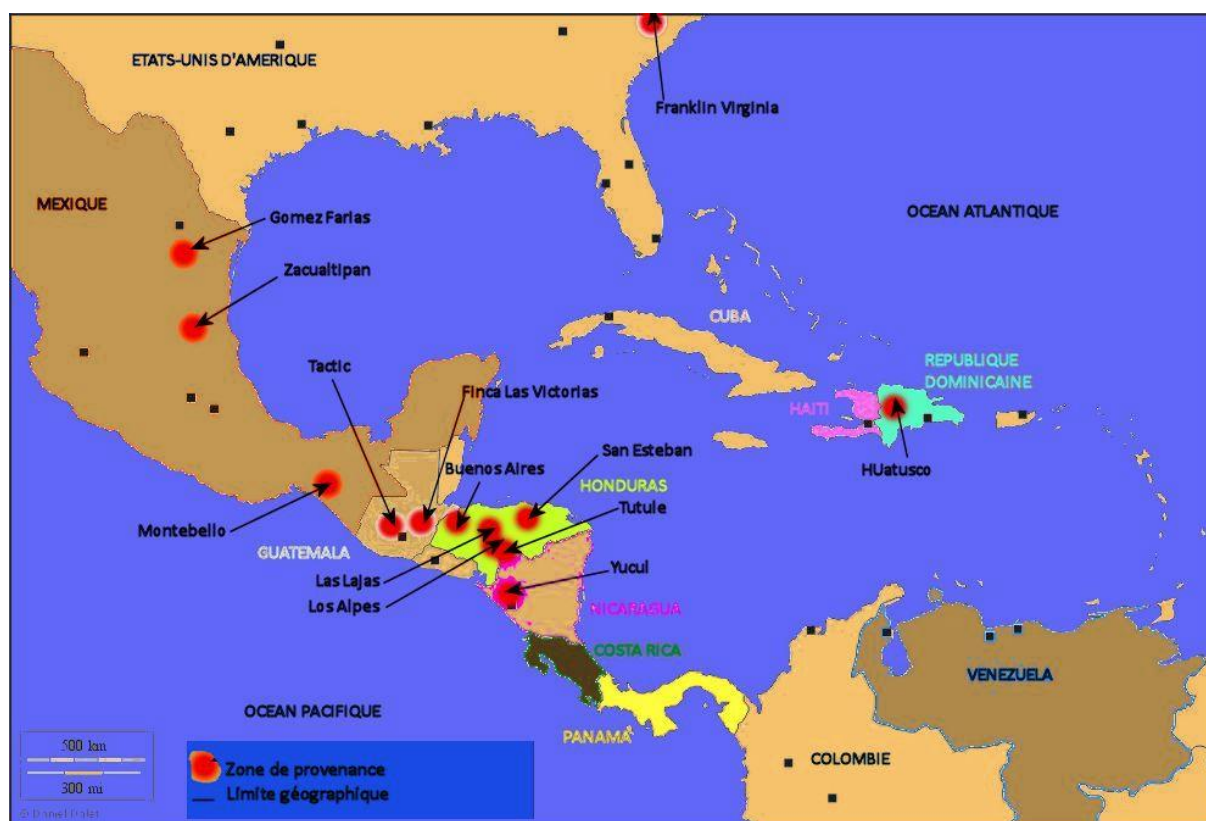
Le liquidambar est un arbre utilisé pour des reboisements sur certaines parties du continent Américain, qui présente de fortes potentialités quant à l'utilisation de son bois. Dans la suite de cette revue nous allons nous intéresser à la plantation de Liquidambar à Mandraka (Madagascar).

### III- L'ESSAI DE PROVENANCE DE *LIQUIDAMBAR STYRACIFLUA* L. A MANDRAKA

#### 3-1- Dispositif de l'essai de provenances à Mandraka

Dans le cadre d'un essai international de provenances de *Liquidambar styraciflua*, le Commonwealth Forestry Institute (CFI) d'Oxford avait fait parvenir des graines de treize provenances, récoltées essentiellement dans l'aire de distribution naturelle de l'espèce située à l'Est des Etats-Unis d'Amérique, du Mexique et d'Amérique centrale (Carte 2). En 1986, ces 13 provenances de Liquidambar ont été introduites à Mandraka (Tableau 2).

Le dispositif expérimental est constitué par 4 blocs complets randomisés avec des parcelles unitaires de 36 plants (6 x 6) par provenance (Figure 10). Avant la plantation, le terrain était recouvert d'une maigre forêt secondaire dominée principalement par les espèces telles que Harongana (*Harungana madagascariensis*), Lalona (*Weinmania spp*) et Hafotra (*Dombeya sp*). Après défrichage, aucun labour ni apport de fertilisant n'ont été réalisés sur le site, et en conséquence, des trous (80 x 80 cm) ont été creusés sur les banquettes en courbe de niveau. Le bloc I est en bas de pente, le bloc II sur pente (pente moyenne de 65%) du versant Est, le bloc III sur la ligne de crête et le bloc IV sur pente mais situé sur le versant ouest du site d'essai (Figure 10 et Figure 11). Selon les suivis périodiques réalisés par les agents du DRFP, la provenance Franklin Virginia des Etats-Unis d'Amérique n'a pas réussi à se développer correctement. Ainsi, à partir de 1993, cette provenance a été abandonnée et les parcelles ont été peu à peu envahies par des recrûs herbacés et ligneux.



Carte 2: Localisation des provenances de *Liquidambar styraciflua* dans son aire naturelle

Tableau 2: Caractéristiques des provenances de *Liquidambar* introduites à Mandraka

N°	Provenance	Pays	Longitude	Latitude	T°moy (°C)	Altitude (m)	Pluviométrie (mm)
1	Franklin, Virginia	USA	76°55'W	36°40'N	13.0	548	940
2	Gomez Farias	Mexico	99°10'W	23°06'N	17.0	950-1450	1800-2500
3	Zacualtipan	Mexico	98°37'W	20°42'N	13.6	1800-1870	2047
4	Huatusco	Mexico	69°58'W	19°05'N	18.8	1350-1550	1746
5	Buenos Aires	Honduras	88°11'W	15°30'N	25.0	900-1080	2000
6	Montebello	Mexico	91°44'W	16°04'N	18.0	1500	1836
7	Tactic	Guatemala	90°21'W	15°19'N	17.3	1380-1420	2079
8	Finca las Victorias	Guatemala	89°22'W	15°12'N	22.4	800-1000	2000
9	Las Lajas	Honduras	87°34'W	14°48'N	21.4	1100-1200	1700
10	San Esteban	Honduras	85°35'W	15°22'N	21.0	640-800	1300-1500
11	Tutule	Honduras	87°50'W	14°12'N	17.0	1400-1700	1900
12	Los Alpes	Honduras	87°58'W	14°33'N	18.0	1250-1350	1400-1600
13	Yucul	Nicaragua	85°48'W	12°55'N	22.4	850-1100	1394

USA : United States of America

T° moy : Température moyenne annuelle

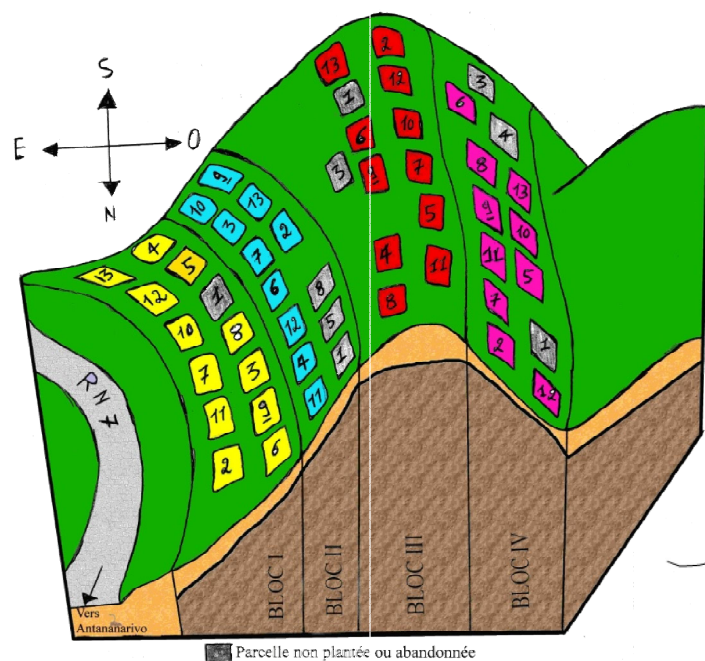


Figure 10 : Dispositif expérimental de l'essai provenances à Mandraka  
(Source : Herizo Rakotovololonalimanana)

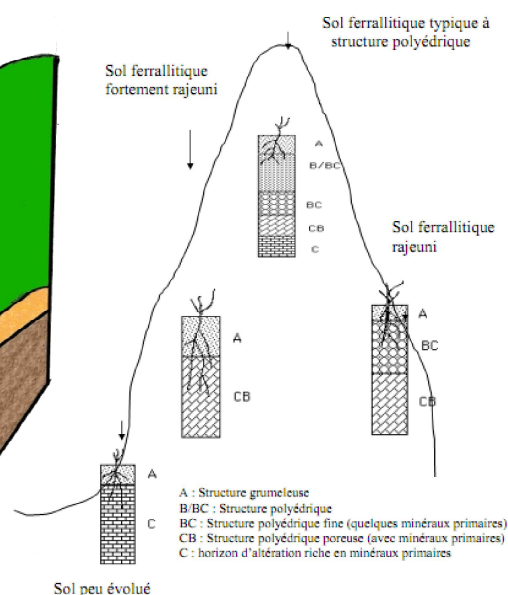


Figure 11 : Type de sol à Mandraka  
(Rajoelison et *al*, 2007)

### 3-2- Suivis et entretiens réalisés dans l'essai de provenances à Mandraka

En 1986, la densité initiale de plantation était de 1600 tiges/ha, soit un écartement de 2,5 x 2,5 m. Les suivis du site ont été réalisés annuellement par les agents du DRFP à partir de 1992. Toutefois, dès 1999, à cause de la fermeture de la canopée, il n'était plus possible de mesurer avec fiabilité la hauteur totale. A cette date, l'essai comptait 854 pieds (soit en moyenne 600 tiges/ha) après mortalité et une éclaircie sélective. En 2008, lors de la dernière mesure effectuée pour la circonférence par le DRFP, le site ne comptait plus que 465 pieds (soit en moyenne 300 tiges/ha ou environ 11 pieds par provenance) suite à une seconde éclaircie. Le taux d'éclaircies était de 30% et 42 % respectivement réalisées à 10 ans (1996) et à 17 ans (2003) après la plantation. En 2011, suite à une troisième éclaircie du bloc I à 23 ans (2009) et du bloc III à 24 ans (2010) avec un taux de 30%, le site comptait 411 pieds (soit en moyenne 274 tiges/ha). Cette même année, la hauteur totale et la circonférence à 1,30 m ont été mesurées sur neuf (9) des douze (12) meilleures provenances en termes de croissance en hauteur et en diamètre du site d'essai afin de comparer les caractéristiques dendrométriques de Liquidambar à Mandraka et pour les besoins du présent travail.

## CONCLUSIONS

Le bois est un matériau complexe à étudier. C'est un matériau d'origine végétal, hétérogène et anisotrope. Les propriétés (physiques, mécaniques, chimiques, ...) du bois sont irrégulièrement réparties et des singularités de croissance différencient chaque pièce. De ce fait, elles varient entre arbres et au sein d'un même arbre. Pour pouvoir étudier le bois, il faut prendre soin de faire un échantillonnage adéquat qui soit représentatif et qui prenne en compte toutes ces variabilités. Pour répondre à certaines questions pratiques comme quelle est la meilleure provenance, quelles sont les valeurs de l'héritabilité des propriétés du bois, et quelles sont les corrélations génétiques entre la croissance de l'arbre et les propriétés de son bois? Comment peut-on exploiter le bois ? La recherche en génétique et en sciences du bois sont nécessaires. Tout programme d'amélioration génétique d'une espèce doit obligatoirement débiter par l'étude de la variabilité qui seule permettra de faire le choix des provenances adaptées. Pour ce faire, la meilleure méthode est d'implanter des plantations comparatives de provenances dans le milieu concerné et de suivre le comportement des différentes provenances étudiées. Cependant, cette approche ne conduit toujours pas nécessairement au meilleur choix final. La réalisation de l'essai de provenance nous apportera des informations importantes sur le comportement de l'espèce ainsi que sur ses propriétés.

*Liquidambar styraciflua* L, originaire d'Amérique a de plus un caractère intéressant qui est sa résistance aux insectes en plantation. L'espèce a des faiblesses comme la sensibilité au feu, et à certains agents défoliateurs. Son bois, facile à usiner et acceptant bien tous types de finitions, intéresse le secteur industriel pour des applications diverses comme l'ameublement, les panneaux, les instruments de musique. La suite de notre étude qui concerne le *Liquidambar styraciflua* L. de l'essai de provenance à Mandraka va essayer d'apporter des réponses aux questions sus mentionnées.

## **PARTIE II : DEMARCHE GENERALE DE L'ETUDE**

Afin d'évaluer l'adaptation et la croissance de Liquidambar à Mandraka, les caractéristiques dendrométriques de l'espèce ainsi que leurs variabilités ont été analysées à partir des données de suivis annuels du diamètre et de la hauteur, réalisés par les agents du DRFP sur les 12 provenances et de l'inventaire que nous avons effectué sur les 9 provenances en 2011 (Huatusco, Los Alpes, San Esteban, Tactic, Tutule, Las Lajas, Finca las Victorias, Buenos Aires, et Yucul). Ces données dendrométriques ont été ensuite comparées aux caractéristiques dendrométriques d'essences courantes introduites à Madagascar, aux données relatives aux essais de provenances de l'espèce dans le monde et aux caractéristiques dendrométriques de Liquidambar introduites dans l'île depuis les années 1950 se trouvant dans les arboreta ou stations forestières (ANNEXE 1). Cette section constituera le premier chapitre de ce travail.

Dans l'objectif de connaître la capacité de multiplication de l'espèce dans le contexte malgache, des tests de germination, des suivis de croissance des jeunes plants ont été réalisés à partir des graines collectées sur le site d'essai de provenances à Mandraka. La croissance juvénile des descendants a été comparée à celles des parents pour évaluer la corrélation des valeurs parents-descendants en croissance. Ensuite, l'héritabilité de ses paramètres a été calculée afin de pouvoir déduire s'ils peuvent être intégrés dans des programmes d'amélioration ou pas. Ce travail formera le deuxième chapitre de cette thèse.

Afin de déterminer les propriétés technologiques du bois de Liquidambar, 54 arbres d'éclaircies dans le bloc I et III, provenant des 9 meilleurs provenances en hauteur et en diamètre ont été abattus. Compte tenu de l'objectif final de l'essai de provenances à Mandraka, qui est de produire des semences, nous n'avons pu considérer que des arbres d'éclaircie qui néanmoins venaient d'une troisième éclaircie. Les blocs I et III ont été choisis pour leurs situations géographiques contrastées [bas de pente et sur la ligne de crête (Figure 10)] et du fait que les neufs (9) provenances sont seulement représentées dans ces deux blocs. La caractérisation des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar a été effectuée avec des méthodes normalisées et des approches vibratoires. La durabilité naturelle (DN) a été évaluée selon des tests normalisés. L'étude des propriétés physico-mécaniques et de durabilité naturelle du bois de Liquidambar et leur variabilité intra-arbre constituera le troisième chapitre de ce travail.

Afin de pouvoir exploiter correctement l'essai de provenances et pour répondre à nos objectifs, nous avons collecté 99 carottes de bois de 1,5 cm de diamètre issues des arbres co-dominants ou dominants (une carotte par arbre et 3 arbres par provenance et par bloc) en considérant les quatre (4) blocs. Sur la base de ces carottes de bois, nous avons prédit les propriétés physico-mécaniques par spectroscopie proche infra-rouge (SPIR). Pour l'ensemble des propriétés physico-mécaniques, nous avons cherché à établir des modèles de prédiction au moyen de la SPIR en se basant sur les valeurs des propriétés du bois obtenues avec les méthodes standardisées sur les 54 arbres du chapitre précédant. Le module d'élasticité a été à la fois prédit par la méthode SPIR et par un dispositif ultrasonore. Afin de comparer le module d'élasticité prédit par SPIR et mesuré par le dispositif ultrasonore, 30 éprouvettes sans défaut dans les 54 arbres ont été utilisées pour le paramétrage de l'appareil ultrasonore. L'élaboration et la validation du modèle de prédiction SPIR, le paramétrage du dispositif de mesure ultrasonore, la caractérisation des propriétés du bois de Liquidambar à partir des carottes et la comparaison des valeurs du module d'élasticité prédite avec celles mesurées par le dispositif ultrasonore ainsi que la variabilité intra-arbre des propriétés physico-mécaniques des arbres dominants et/ou co-dominants (à partir des données obtenues sur les carottes) formeront la quatrième partie de cette thèse.

L'objectif ultime de la thèse étant de d'évaluer le déterminisme génétique des propriétés de croissance et du bois du Liquidambar. L'étude de la variabilité inter-arbre, l'étude du contrôle génétique des caractéristiques dendrométriques, de la germination, de la croissance juvénile, des propriétés physico-mécaniques et de durabilité naturelle du bois de Liquidambar ainsi que leurs corrélations formeront le cinquième et dernier chapitre de ce travail.

La Figure 12 résume toutes les démarches et différentes parties de ce travail.



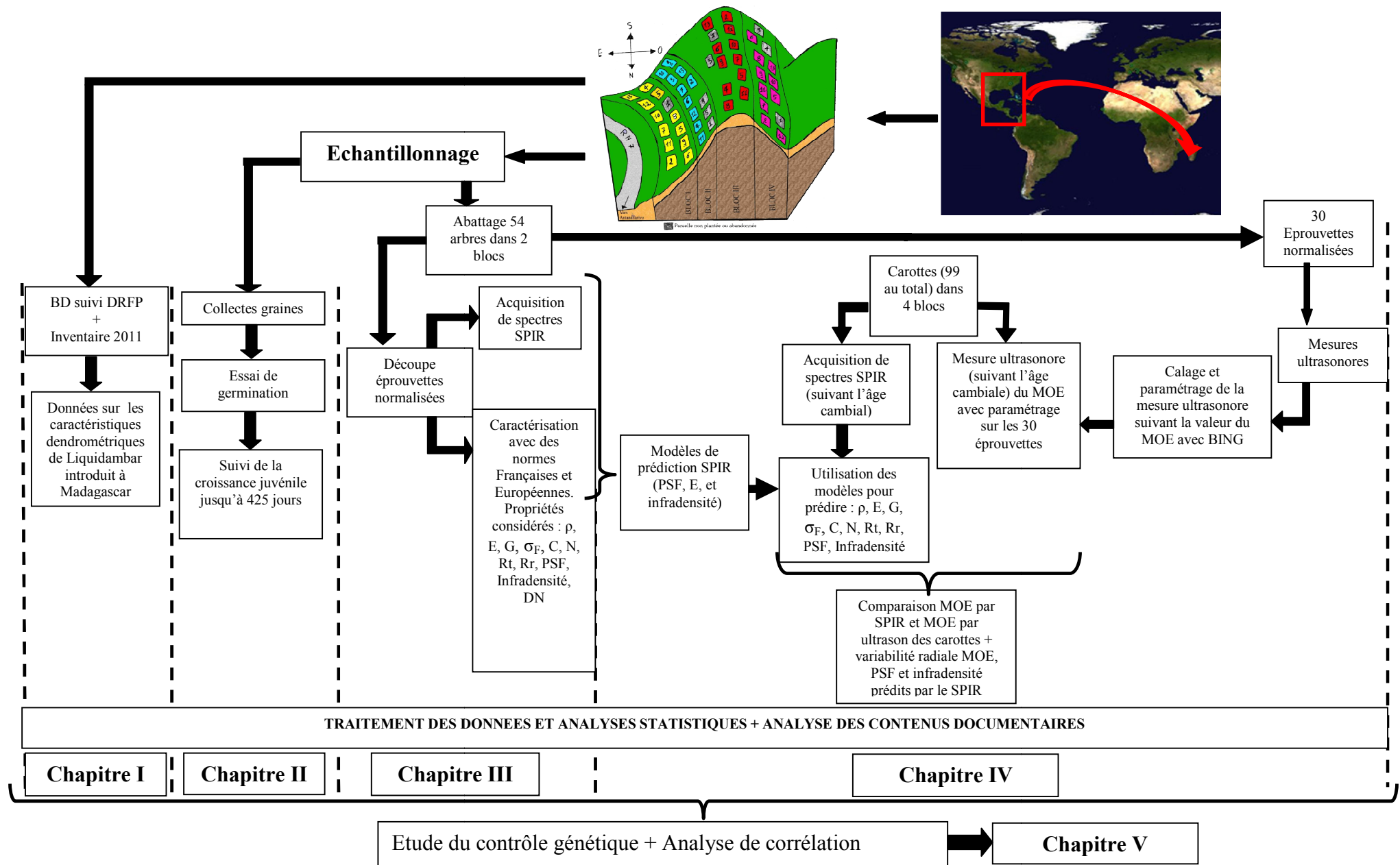


Figure 12 : Récapitulatif de la démarche générale de l'étude

**PARTIE III : ETUDE DE *LIQUIDAMBAR*  
*STYRACIFLUA* L. DE MANDRAKA**

## CHAPITRE I : ADAPTATION ET VARIABILITE GENETIQUE DE LA CROISSANCE DE *LIQUIDAMBAR STYRACIFLUA* L. DU VERGER DE MANDRAKA (MADAGASCAR)

### I- INTRODUCTION

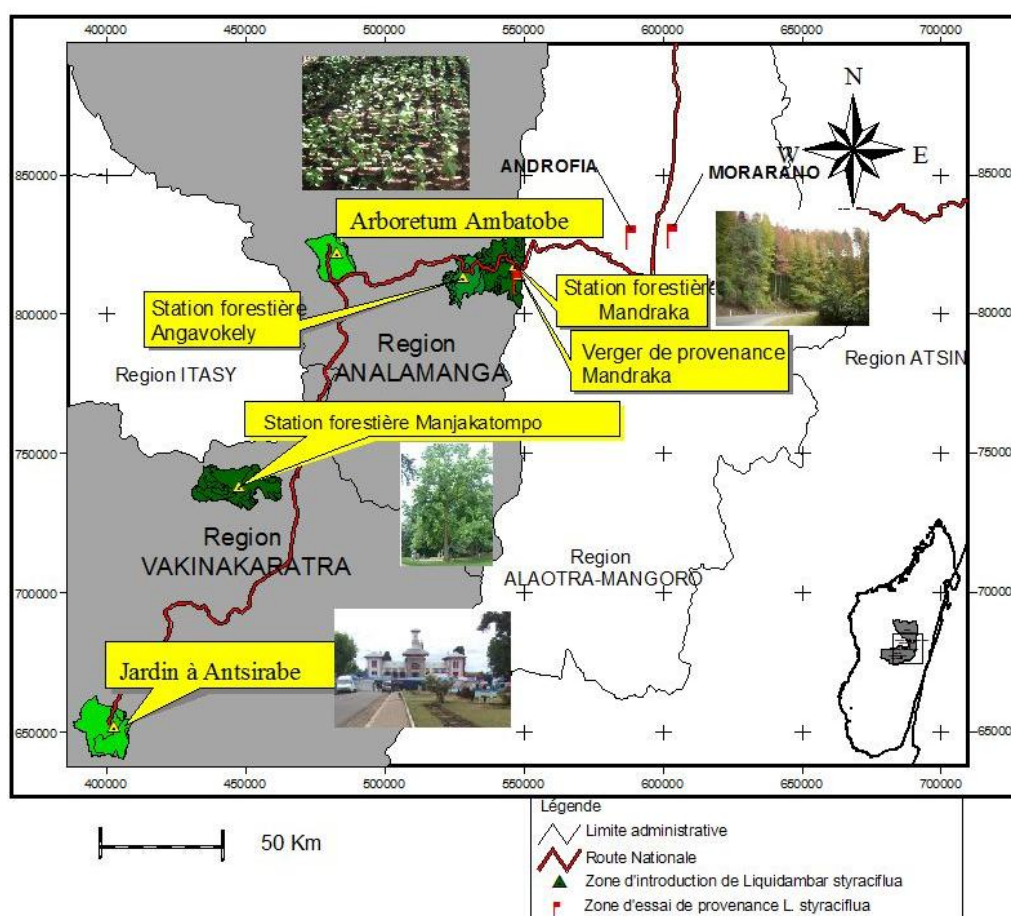
*Liquidambar styraciflua* L ou copalme d'Amérique fait partie des espèces feuillues les plus importantes des forêts du sud est des Etats-Unis d'Amérique. Elle a une très grande tolérance sur les différents types de sols mais ses zones de prédilection sont les sols profonds, acides et bien arrosés (Wright & Cunningham, 2008). *Liquidambar styraciflua*, est depuis longtemps utilisé comme essence de reboisement, notamment en Amérique Latine (Sabistina, 2010).

*Liquidambar styraciflua* a été introduit à Madagascar dans les années 50 (FOFIFA, 1990a) dans différents arboreta et stations forestières (Carte 3). En 1986, un essai international de provenances de *Liquidambar styraciflua* a été initié par le Commonwealth Forestry Institute (CFI) d'Oxford. Le verger du site de Mandraka, à Madagascar, a été choisi, en plus de cinq autres localités du continent Sud Américain : Xalapa (Mexique), Agudos, Iguaçu, Paraguaçu, Colombo (Brésil) (Mendizabal et al, 2009 ; Shimizu & Spir, 1999, 2002; Sebbenn et al, 2007; Mattos et al, 2001). Contrairement aux sites mexicains et brésiliens pour lesquels les auteurs cités ci-avant ont rapporté de nombreux résultats, peu de données ont été publiées pour les essais malgaches. Aussi, ce travail se propose d'évaluer l'adaptation de cette essence à Mandraka, alternative potentielle au reboisement en Pins et en Eucalyptus, en étudiant la variabilité intraspécifique des caractères de croissance par rapport (1) aux autres espèces introduites et largement répandues à Madagascar (*Pinus* et *Eucalyptus*), (2) aux *Liquidambar* issus de cinq autres plantations ponctuelles (Carte 3), (3) aux essais internationaux du CFI d'Oxford.

## II- MATERIELS ET METHODES

### 2-1-Matériel végétal

Le matériel d'étude est constitué par les 13 provenances de *Liquidambar styraciflua* de l'aire naturelle introduites à Mandraka en 1986 (Tableau 2). Le site d'essai à Mandraka (Carte 3) se trouve à 67 km à l'Est de la capitale, sur un terrain dont la pente est de 80% à 90% (ANNEXE 2). En plus de l'essai de provenances à Mandraka, ce travail prendra aussi en compte les *Liquidambar styraciflua* plantés dans cinq autres sites à Madagascar (Carte 3).



Carte 3 : Zones d'introduction et localisation de l'essai de provenances de *Liquidambar styraciflua* à Madagascar

## 2-2-Paramètres considérés

Pour évaluer l'adaptation du Liquidambar à Mandraka, les bases de données du DRFP-FOFIFA (Département de Recherche Forestière et Piscicole du FOFIFA) contenant les relevés annuels de la hauteur totale (années 1992 à 1999) et de la circonférence à 1,30 m (exprimée en diamètre) (année 1992 à 2008) ont été considérées. La fermeture de la canopée rendait difficile le relevé des hauteurs après 1999, mais à la suite des éclaircies partielles, les mesures ont pu reprendre.

Selon l'étude de Ducrey & Huc (1999), l'effet de l'éclaircie peut être appréhendé pendant les 5 années qui la suivent. Les thèses de Vincent (2010) et de Goudiaby (2011) confirment que les effets de ce type de soin sylvicole sur la croissance de l'épinette noire (*Picea mariana*) peuvent être perçus même 2 ans après. Dans ce travail, et pour considérer l'effet de l'éclaircie, il a été décidé de ne prendre que les périodes de 3 ans après chaque éclaircie. C'est-à-dire à 13 ans (1999), à 20 ans (2006) et à 25 ans (2011) après plantation.

Pour l'inter-comparaison avec les essais internationaux du CFI, les mêmes paramètres (hauteur et diamètre) ont été considérés à 9, 11, 16 et 19 ans après la plantation.

Lors de travaux menés par l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, départements des Eaux et Forêts (ESSA-forêts) en 2012 sur la station forestière de Mandraka (sur deux parcelles de Liquidambar différentes du verger) (Carte 3), en plus de la circonférence et de la hauteur, l'index PHF des arbres a été évalué. Cet index PHF comprend : P, la position du houppier et indique ainsi le degré de dominance et de couverture ; H, la forme du houppier ; F, la forme du tronc de l'arbre (Blaser, 1984). Indépendamment des données dendrométriques, l'index PHF, permet d'affiner la qualification des arbres plantés.

Aucun soin sylvicole particulier n'a été entrepris sur les parcelles de la station forestière de Mandraka.

## 2-3-Méthode d'analyse

Afin d'identifier les tests appropriés pour chaque type de comparaisons, le test de Shapiro-Wilk a été exécuté sous R (R Development Core Team, 2012) pour vérifier la normalité de la distribution des variables considérées, et le test de Bartlett pour l'identification de l'homogénéité de leur variance (Mouchirou, 2003; Saporta, 2006). Si la loi de probabilité des variables suit une loi normale et leurs variances sont homogènes, l'analyse de la variance (ANOVA ou AOV) sera alors le test utilisé pour la comparaison des moyennes. Dans le cas contraire, le test de Kruskal Wallis sera utilisé. La méthode de Holm a été ensuite appliquée afin de déceler les différences deux à deux de chaque provenance. Le choix de cette méthode

est justifié par le fait qu'elle intègre l'erreur de type 1 et donne une probabilité de retour (ou p-value) ajustée qui s'interprétera de la même façon que les autres seuils de « p-value » (Ambroise, 2007) (ANNEXE 3).

Pour l'analyse de variance, le paramètre du modèle statistique est du type (Equation 1) :

Equation 1) 
$$Y_{ij} = \mu + B_i + P_j + (BP)_{ij} + \varepsilon_{ij}$$

Où

$i = 1, \dots, I$  : nombre de bloc

$j = 1, \dots, J$  : nombre de provenance

$Y_{ij}$  : valeur phénotypique mesurée sur l'individu de provenance J sur le bloc

$\mu$  : moyenne globale

B : effet du bloc de répétition avec comme variance  $\sigma^2_B$

P : effet de la provenance avec comme variance  $\sigma^2_P$

BP : effet d'interaction bloc-provenance avec comme variance  $\sigma^2_{BP}$

$\varepsilon_{ij}$  : résidus à effet aléatoire de variance  $\sigma^2_\varepsilon$

## 2-4-Estimation de l'héritabilité des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar

L'analyse de la variabilité génétique se traduit par une étude du contrôle génétique ou de l'héritabilité (au sens strict et/ou large) du caractère étudié. L'héritabilité au sens large ou hérabilité génotypique ( $h^2_G$ ) a été calculée à partir de l'analyse de variance (Tableau 3) et selon la formule de Nanson (1970) (Equation 9). Ce dernier paramètre renseigne sur les proportions des caractères transmis par les parents à leurs descendants lors d'une multiplication générative, permettant alors de définir le niveau du contrôle génétique affectant le caractère étudié.

Selon le concept de Nanson (1970), une valeur phénotypique (P) peut être composée par une valeur génotypique (G) une déviation environnementale (E) (Equation 2) :

Equation 2) 
$$P = G + E$$

Dans ce sens, l'héritabilité au sens large est (Equation 3)

Equation 3) 
$$h^2_G = \frac{\sigma^2_G}{\sigma^2_P}$$

Du fait de la randomisation, la covariance (G, E) est nulle ; ainsi (Equation 3) peut s'écrire (Equation 4) :

Equation 4) 
$$\sigma^2 P = \sigma^2 G + \sigma^2 E$$

Dans le cas d'une distribution normale et d'indépendance des facteurs pour des expériences avec J élément, répétées I fois, on a (Equation 5)

Equation 5) 
$$\sigma^2 P = \sigma^2 X = \sigma^2 Y + \sigma^2 E$$

Ainsi on déduit que (Equation 6) :

Equation 6) 
$$\sigma^2 G = \sigma^2 Y$$

La part de la variance phénotypique attribuable au facteur élément est donc (Equation 7) :

Equation 7) 
$$\sigma^2 Y = \frac{\sigma^2 Y}{\sigma^2 Y + \sigma^2 \varepsilon}$$

Où  $\sigma^2 Y$  est l'héritabilité génotypique appliquée aux valeurs X. Dans notre expérimentation, les répétitions ne sont pas égales. La considération de cette inégalité conduit à l'équation (Equation 8) :

Equation 8) 
$$h^2 G = \frac{\sigma^2 Y}{\sigma^2 Y + \frac{\sigma^2 \varepsilon}{I}}$$

Dans le Tableau d'analyse de variance,  $\sigma^2 \varepsilon = C$  et  $\sigma^2 y = (A-C)/I$  ; ainsi, l'équation (Equation 8) devient :

Equation 9) 
$$h^2 G = \frac{\sigma^2 Y}{\sigma^2 Y + \frac{\sigma^2 \varepsilon}{I}} = \frac{A - C}{A} = 1 - \frac{1}{F}$$

Nanson (1970)

Tableau 3 : Tableau d'analyse de variances

Sources	degré de liberté (ddl)	Carrés Moyens (CM)	F calculée
Provenances	J - 1	$\sigma^2_P (A)$	$F = \sigma^2_P / \sigma^2_\varepsilon$ $\sigma^2_B / \sigma^2_\varepsilon$
Blocs	I - 1	$\sigma^2_B (B)$	
Résidus	(J-1) (I-1)	$\sigma^2_\varepsilon (C)$	
Total	IJ-1		

A =  $\sigma^2_P$  : variance intra provenance

AB =  $\sigma^2_B$  : variance intra bloc

C =  $\sigma^2_\varepsilon$  : variance des résidus ou variance totale

J : nombre de provenances

I : nombre de répétitions (bloc)

L'héritabilité est une valeur comprise entre 0 et 1. Selon les travaux de Hanrup et al (2004) sur du bois de *Picea abies*, l'héritabilité est élevée si elle est supérieure à 0,4. Elle est moyenne si elle est comprise entre 0,2 et 0,4 et elle est faible si elle est inférieure à 0,2. Pour

ce qui est du contrôle génétique, le travail de Wei & Borralho (1997) sur *Eucalyptus urophylla* rapporte qu'un paramètre est considéré sous fort contrôle génétique si l'héritabilité est supérieure ou égale à 0,7. Dans la suite de notre étude, nous allons utiliser ces classifications pour qualifier l'héritabilité et le contrôle génétique des caractères de croissances et ceux propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar.

### III- RESULTATS

#### 3-1-Croissance de *Liquidambar styraciflua* à Mandraka (verger)

Quand l'âge augmente, la croissance de l'espèce diminue progressivement en hauteur, mais en diamètre, elle garde une allure constante jusqu'à 25 ans.

A 13 ans, la hauteur moyenne de *Liquidambar styraciflua* à Mandraka (854 individus), est de 19,5 m ; son accroissement moyen annuel est de 1,5 m/an. A 25 ans, la hauteur moyenne de Liquidambar du verger de Mandraka (toutes provenances et blocs confondus) est de 26,1 m. L'accroissement moyen annuel en hauteur de la plantation à 25 ans est de 1,04 m/an.

Le diamètre moyen de Liquidambar sur l'ensemble du verger est de 21,8 cm, 31,9 cm et 38,4 cm respectivement à 13, 20 et 25 ans. L'accroissement moyen annuel est de 1,68, 1,59 et 1,53 cm/an respectivement à 13, 20 et 25 ans.

La valeur moyenne du diamètre à 20 ans (Tableau 4), dépassant déjà le seuil d'exploitabilité des bois d'œuvre de plantation régi par la législation forestière malgache (diamètre supérieur à 30 cm, décret N° 98-782 du 16 septembre 1998), signifie que dans un contexte sylvicole, il s'avère possible d'établir un plan d'exploitation avec une révolution de 20 ans pour le cas de Liquidambar.



Tableau 4 : Caractéristiques dendrométriques du *Liquidambar styraciflua* du verger de Mandraka

Paramètre	H	AAMH	Ø	AAMD	Ø	AAMD	H	AAMH	Ø	AAMD
Année	1999	1999	1999	1999	2006	2006	2011	2011	2011	2011
Age (années)	13	13	13	13	20	20	25	25	25	25
Unité	m	m/an	cm	cm/an	cm	cm/an	m	m/an	cm	cm/an
n	854	854	854	854	465	465	305	305	305	305
Gomez Farias	18,5	1,43	20,6	1,59	31,5	1,58	-	-	-	-
Zacualtipan	13,3	1,02	16,5	1,27	26,5	1,32	-	-	-	-
Huatusco	18	1,31	20	1,54	30,3	1,52	24,5	0,98	36,2	1,45
Buenos Aires	21	1,59	24	1,84	35,8	1,79	27,3	1,09	42,5	1,7
Montebello	19,7	1,48	21,3	1,64	29,3	1,46	-	-	-	-
Tactic	19,1	1,45	21,2	1,63	30,7	1,53	25,8	1,03	35,4	1,42
Finca Las Victorias	20,6	1,58	24	1,85	34,4	1,72	27,6	1,1	41,5	1,66
Las Lajas	20,3	1,55	22,3	1,72	31,2	1,56	25	1	36,2	1,45
San Esteban	20,5	1,56	22,2	1,71	32,7	1,64	25,5	1,02	39,2	1,57
Tutul	18,9	1,46	20,7	1,59	33,2	1,66	27,2	1,09	38	1,52
Los Alpes	19,7	1,48	22,2	1,71	33,1	1,65	26,9	1,08	39,2	1,57
Yucul	19,4	1,49	23	1,77	32,2	1,61	25,9	1,04	39	1,56
Moyenne	19,5	1,5	21,8	1,68	31,9	1,59	26,1	1,04	38,4	1,53
Ecart-type	4,09	0,46	5,64	0,43	6,23	0,31	2,87	0,11	7,54	0,30

Ø : Diamètre à 1,30 m, H : hauteur totale, n = nombre d'individus

AAMH : Accroissement Annuel Moyen en Hauteur, AAMD : Accroissement Moyen Annuel en Diamètre

### 3-2-Variabilité intraspécifique de la croissance de *Liquidambar styraciflua* du verger de Mandraka

Les tests d'adéquation ont montré que la hauteur et le diamètre suivent une loi normale et leurs variances sont homogènes. Les analyses de variance (ANOVA) ont démontré qu'au seuil de 0,1 à 5%, la provenance a un effet significatif sur la croissance moyenne en hauteur et en diamètre de *Liquidambar styraciflua* (Tableau 5). Les douze provenances introduites à Mandraka, n'ont pas alors les mêmes potentialités de croissance. L'effet bloc est statistiquement significatif vis-à-vis de la valeur moyenne de la hauteur de *Liquidambar* à 13 ans. En revanche, il n'est plus significatif 25 ans après la plantation. L'effet d'interaction bloc x provenance n'est significatif que pour la hauteur à 13 ans.

La compilation des tests d'égalité deux à deux des moyennes par la méthode de Holm concernant la hauteur et le diamètre à 25 ans a révélé que les provenances Buenos Aires et Finca Las Victorias ont les croissances les plus élevées (ANNEXE 6). Les provenances Zacualtipan et de Huatusco sont en fin de classement. Les autres provenances présentent une croissance en hauteur et en diamètre intermédiaire.

La valeur élevée de l'héritabilité du diamètre et de la hauteur allant de 0,60 à 0,87 confirme que ces paramètres sont sous fort contrôle génétique. En effet, selon la valeur de l'héritabilité, 60% à 87% de la variance des caractères de croissance des parents peuvent être transmis à leurs descendants dans le cas d'une multiplication générative. Il est donc envisageable de réaliser des sélections au niveau des provenances en se basant sur la valeur moyenne de la hauteur et du diamètre des individus qui les composent.

Tableau 5: Comparaison de la moyenne des hauteurs et des diamètres de *Liquidambar* à Mandraka suivant les provenances, les blocs et leurs interactions

Paramètre	Source de variabilité	Age	13 ans (1999)		20 ans (2006)		25 ans (2011)	
		ddl	p	h <sup>2</sup> <sub>G</sub>	p	h <sup>2</sup> <sub>G</sub>	p	h <sup>2</sup> <sub>G</sub>
Ø <sub>1,30</sub>	Bloc	3	0,339		0,327		0,811	
	Provenance	12	0,001**	0,81	0,001**	0,76	0,011*	0,60
	Bloc * Provenance	26	0,435		0,487		0,252	
Hauteur (m)	Bloc	3	0,001***		-		0,830	
	Provenance	8	0,001***	0,87	-	-	0,001***	0,76
	Bloc * Provenance	21	0,001***		-		0,222	

Ø<sub>1,30</sub> : diamètre à 1,30m  
ddl : degré de liberté  
p : probabilité de retour  
h<sup>2</sup><sub>G</sub> : héritabilité génotypique

\* : significative au seuil de 5%  
\*\* : significative au seuil de 1%  
\*\*\* : significative au seuil de 0,1%

### 3-3-Adaptation et croissance de *Liquidambar* dans les autres sites d'introduction

Tous les arboreta, stations forestières, jardins ou essai de provenances où *Liquidambar styraciflua* a été introduit se trouvent sur le versant est de Madagascar à l'exception de Manjakatampo (Carte 3). Cette dernière station est toutefois tournée vers l'est du massif de l'Ankaratra. Toutes les zones d'introduction de *Liquidambar* ont une altitude supérieure à 1200 m et des pentes généralement supérieures à 60%. Elles ont une pluviométrie et une température moyennes annuelles respectivement supérieures à 1300 mm et 15°C.

Ces régions sont habituellement balayées par des vents frais et humides presque toute l'année. Toutes les provenances de *Liquidambar styraciflua* semble s'adapter à ces conditions qui sont semblables à son aire naturelle dans la mesure où il n'y a pas d'aléas climatiques ni de feux de forêts (Tableau 6). En 2011, lors de l'inventaire du site d'essai de provenances et de la réalisation de l'éclaircie du bloc III, il a été constaté que les rejets de souches (Photographie 9) et/ou les sauvageons (Photographie 10) de *Liquidambar* se développent bien. Ce constat a été confirmé par les résultats des travaux de l'ESSA-Forêts dans la station forestière de Mandraka (Tableau 6). Les valeurs moyennes du PHF de 322 et 323 respectivement sur les parcelles A 21 et A 37 de cette station forestière, sous-entendent que

les individus de la plantation ont des houppiers étroits. Ce résultat est prévisible en raison de l'absence des soins sylvicoles et de la forte densité de peuplement. En 2012, 25 ans après la plantation, les deux parcelles A 37 et A 21 présentent une densité de plantation respectivement de 1500 tiges/ha et 2140 tiges/ha. Par contre, les fûts des individus sont généralement rectilignes ( $F = 2$ ). Ces valeurs confirment l'adaptation et la potentialité en croissance de l'espèce à Mandraka.



Photographie 9 : Rejet de souche de *Liquidambar styraciflua* du verger à Mandraka

Source : Herizo Rakotovololonalimanana



Photographie 10 : Sauvageons de *Liquidambar styraciflua* du verger à Mandraka

Source : Herizo Rakotovololonalimanana

Tableau 6: Caractéristiques dendrométriques de Liquidambar dans les zones d'introductions à Madagascar

Date de plantation	Lieu d'introduction	Origine graines	Type de site	Age à la mensuration (ans)	Caractéristiques dendrométriques		Surface plantée	Observations	Résultats	Autres résultats	Source
					Ø (cm)	h (m)					
1948	Angavokely	Antanarivo	Station forestière avec arboretum	41	NI	NI	Parcelle H5 de la section H de l'arboretum 3,85 ares	Plantation frappée par des cyclones	Toutes les tiges ont péri	NI	FOFIFA (1990a)
1951	Manjakatampo	Tsimbazaza	Station forestière avec arboretum	38	25 cm	21 m	Parcelle C4 de l'arboretum d'Antsoamangana 6,25 ares	En 2011, la plantation était très dense, les plants étaient vigoureux, à fûts droits mais il existait des insertions verticales des branches	En 1989, la parcelle de C4 comptait 57 tiges	En 2011 Ø = 40 à 45 cm h = 25 m	FOFIFA (1990b) + Observation en 2011
1954	Antsirabe	NI	Jardin	9	22	12	NI	Il n'y avait pas de parcelle de plantation mais des bouquets d'arbres voire des mélanges pieds à pieds d'espèces.		NI	FOFIFA (1990a)
1987	Ambatobe	NI	Station forestière avec arboretum	2	NI	NI	Parcelle A 86 Surface : NI	Plantation de Liquidambar dépérissante		En 2012 2 pieds Ø = 38cm h = 19m	FOFIFA (1990a) + Observation en 2012
1986	Mandraka	13 provenances	Verger de provenances		A 22 ans 34 cm	A 13 ans : 19 m	1,5 Ha	Verger de 12 provenances encore sur pied aujourd'hui			FOFIFA (1990a)
1987	Mandraka	NI	Station forestière avec arboretum	3	NI	NI	Parcelle A37 Surface : 8,5 ares 174 pieds au début	Les plants étaient vigoureux	Sur les 174 pieds plantés en 1987 il restait 154 en 1990.	En 2012 125 pieds (89 adultes et 36 rejets). Ø = 26 cm et h = 24m PHF = 323	FOFIFA (1990a) + TP ESSA-Forêts
1987	Mandraka	NI	Station forestière avec arboretum	3	NI	NI	Parcelle A21 Surface : 8 ares 182 pieds au début		Sur les 182 pieds plantés en 1987 il restait 156 en 1990.	En 2012 171 pieds (115 adultes et 56 rejets) Ø = 26 cm, h = 21 m PHF = 322	FOFIFA (1990a) + TP ESSA-Forêts

NI : Non Identifié, Ø = diamètre à 1,30m au dessus du sol, h = hauteur totale, TP = Travaux Pratiques

## IV- DISCUSSION

### 4-1-Croissance de *Liquidambar*

La croissance en hauteur rapide de *Liquidambar* de l'essai de Mandraka au jeune âge et sa diminution progressive avec l'âge sont conformes aux espèces à tempérament héliophile du type pionnier. Comparée à la croissance des autres espèces de plantation d'âges équivalents à Madagascar (*Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Pinus patula* et *Pinus kesiya*) et dans des conditions écologiques similaires, l'accroissement moyen annuel en hauteur à 13 ans du *Liquidambar* de l'essai de provenances à Mandraka est largement supérieur (Tableau 7). Quant à la croissance en diamètre à 13 ans, celle de *Liquidambar* du verger est deux fois supérieures à celle des espèces du genre *Pinus*. En revanche, elle se rapproche de celle de l'*Eucalyptus camaldulensis* (Tableau 7). Le site d'essai de Mandraka semble donc convenir au développement de l'espèce. De plus, l'accroissement annuel moyen en hauteur et en diamètre de *Liquidambar* de la station forestière de Mandraka, respectivement de 0,9 m et de 1,04 cm à 25 ans, même en l'absence de soins sylvicoles et avec une forte densité de population, confirme l'adaptation et la potentialité élevée en croissance de cette espèce sur cet endroit. Planté dans de bonnes conditions, le *Liquidambar* est une espèce prometteuse en matière de production de bois.

Tableau 7 : Comparaison de la croissance de *Liquidambar* du verger de Mandraka avec quelques espèces introduites courantes dans les mêmes conditions écologiques à Madagascar

Espèce	AAMH (m)	Age (année)	AAMD (cm)	Age (année)	Source
<i>Liquidambar styraciflua</i> de l'essai de provenance à Mandraka	1,5	13	1,68	13	BD DRFP + Inventaire de 2011
	-	20	1,59	20	
	1	25	1,53	25	
<i>Liquidambar styraciflua</i> de la station forestière de Mandraka	0,9	25	1,04	25	ESSA-Forêts, 2012
<i>Pinus patula</i> (zone B du PARV : versant Est du Haut Plateau)	0,74	14	1,23	11	Rakotondraoelina (1994) ; Chauvet (1969) in Ramamonjisoa (1999)
<i>Pinus kesiya</i> à Manjakatampo	0,71	12	1,42	11	Randrianjafy (1993)
<i>Eucalyptus robusta</i> (arbre plus à Périnet Mantadia)	1	16	-----	-----	
<i>Eucalyptus camaldulensis</i> (zone B du PARV : versant Est du Haut Plateau)	-----	-----	1,8	13	Sutter (1990) in Ramamonjisoa (1999)

AAMH : Accroissement Moyen Annuel en Hauteur, AAMD : Accroissement Moyen Annuel en Diamètre

PARV : Projet d'Appui au Reboisement Villageois, BD : Base de données

TP : Travaux Pratiques, ESSA : Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques

#### **4-2-Adaptation de Liquidambar sur le verger de Mandraka**

Au niveau croissance moyenne en hauteur et en diamètre, seul l'essai de provenance de Liquidambar à Iguaçu (Brésil) dépasse celui de Mandraka. Les autres essais (Xalapa, Paraguaçu, et Agudos) ont une croissance moyenne inférieure à celle de Mandraka (Tableau 8). La confrontation des résultats sur les zones de prédilection de Liquidambar décrites par Wright & Cunningham (2008) avec les zones d'occupation de l'espèce décrites par Orwa et *al* (2009) emmène à dire que le site d'Iguaçu est le site où les conditions sont optimales pour la croissance de Liquidambar. Selon l'étude de Shimizu & Spir (2002), ce site présente une température moyenne annuelle comprise entre 15 à 19 °C et une pluviométrie moyenne annuelle de 1250 à 2500 mm (Tableau 8). Enfin, c'est un site qui ne connaît jamais de déficit hydrique avec des précipitations presque uniformes toute l'année. Vis-à-vis des conditions de site, la seule différence d'Iguaçu avec Mandraka se trouve au niveau de la constance des précipitations. Le site de Mandraka constitue alors un site potentiel pour un bon développement de Liquidambar.

Tableau 8: comparaison de la croissance de *Liquidambar* à Mandraka par rapport aux autres essais de provenance du CFI

Paramètre	Localité	Âge	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	Coordonnées géographiques	Température (°C)	Pluviométrie (mm)	Altitude (m)	Source
D <sub>1,30</sub> (cm)	Mandraka	9	13,8	18,1	16,4	1,3	18°54'S 47°55'E	17,5	2300	1200	Shimizu & Spir (1999)
	Agudos	9	12,5	16,5	14,5	1,3	22°19'05''N 48°52'00W	21,1	550	1300	
H (m)	Mandraka	11	13,5	19,4	16,4	2,0	18°54'S 47°55'E	17,5	2300	1200	Shimizu & Spir (2002)
	Iguaçu	11	18,9	21,6	20,4	0,878	25°41'55''S 54°26'13''W	15 à 19	1250 à 2500	196	
D <sub>1,30</sub> (cm)	Mandraka	11	16,4	21,3	19,1	1,576	18°54'S 47°55'E	17,5	2300	1200	Shimizu & Spir (2002)
	Iguaçu	11	21	27,7	23,5	2,28	25°41'55''S 54°26'13''W	15 à 19	1250 à 2500	196	
D <sub>1,30</sub> (cm)	Xalapa	16	13,7	17,4	15,6	1,362	19°34'08''N 19°55'55''W	19,8	1500	1420	Mendizabal et al (2009)
	Mandraka	16	18,6	25,8	23,4	2,246	18°54'S 47°55'E	17,5	2300	1200	
D <sub>1,30</sub> (cm)	Paraguaçu	19	11,64	27,29	20,4	5,134	22°25'S 50°35'W	16	1131	490	Sebbenn et al (2007)
	Mandraka	19	28,8	33,7	31,3	1,837	18°54'S 47°55'E	17,5	2300	1200	

D<sub>1,30</sub> : Diamètre à 1,3m au dessus du sol, H : hauteur totale,

Les différences significatives des moyennes des hauteurs et des diamètres suivant les provenances ont été observées aussi dans tous les autres essais de provenances de *Liquidambar* au Brésil et au Mexique quel que soit son âge (Shimizu & Spir, 1999, 2002 ; Mendizabal et al, 2009 ; Sebbenn et al, 2007). Il existe donc des provenances qui s'adaptent mieux aux sites où elles sont introduites.

Selon Shimizu & Spir (1999, 2002), les provenances issues de latitude au sud de 15°N avec une température moyenne annuelle supérieure à 18 °C ont une meilleure croissance quand elles sont introduites dans d'autres sites, par rapport aux autres provenances de latitude et températures différentes. Selon Sebbenn et al (2007), la croissance des arbres dans les sites d'introduction peut dépendre de la différence entre la pluviométrie de cette dernière avec celle de la zone de provenance. Pour le cas de Mandraka (site d'essai de provenances), l'effet combiné de la température, de la pluviométrie annuelle et de la latitude a conditionné l'adaptation de chaque provenance. En effet, celles de Buenos Aires et Finca Las victorias présentent des conditions climatiques d'origine semblables à celles de Mandraka, avec une altitude comprise entre 900 à 1300 m, une pluviométrie annuelle de l'ordre de 2000 mm et une température moyenne annuelle supérieure à 19°C.

La conclusion avancée par Shimizu & Spir (2002) selon laquelle les provenances au sud de la latitude 15°N s'adaptent mieux, a été vérifiée dans cette étude même si la limite de la latitude a été de 15,5°N. Autrement dit, les provenances se trouvant au sud de la latitude 15,5°N de son aire naturelle de distribution s'adaptent mieux en termes de croissance quand elles sont introduites dans des sites dont les conditions climatiques, topographiques et édaphiques sont semblables à celles de Mandraka.

## CONCLUSIONS

Ce travail a permis de montrer la potentialité de croissance en hauteur et en diamètre de *Liquidambar styraciflua* à Mandraka avec un accroissement moyen annuel en hauteur et en diamètre de 1 m/an et de 1,5 cm/an respectivement à 25 ans. Cette croissance est plus rapide que celle des autres espèces majoritairement introduites à Madagascar comme *Eucalyptus robusta*, *Pinus patula* et *Pinus kesiya* à l'exception d'*Eucalyptus camaldulensis*. Le comportement de croissance de *Liquidambar* correspond à celui d'une espèce pionnière. Il est donc possible de le planter même sur des terrains dénudés ou en friches. Cette étude a mis en évidence qu'il est possible de réaliser une exploitation de l'espèce en tant que bois d'œuvre potentiel avec une révolution de 20 ans. Au niveau variabilité, la provenance a un effet significatif sur la valeur



moyenne de la hauteur et du diamètre. Les provenances telles que Buenos Aires et Finca Las Victorias, se trouvant au sud de la latitude 15,5°N dans son aire naturelle de distribution, avec une altitude comprise entre 900 m à 1300 m et une température moyenne annuelle supérieure à 19°C semblent avoir une grande potentialité d'adaptation quand elles sont introduites dans des endroits comme celui de Mandraka. Le calcul de l'héritabilité a démontré que la hauteur et la circonférence sont sous fort contrôle génétique ( $h^2_G$  entre 0,60 à 0,87). Ces deux paramètres peuvent alors être intégrés comme critères de sélection lors d'un programme d'amélioration génétique et/ou sylvicole. Les résultats de croissance des autres sites d'introduction de Liquidambar à Madagascar confirment l'adaptation de l'espèce sur le versant est de Madagascar dont l'altitude est supérieur à 1200 m, la précipitation supérieure à 1300 mm/an et la température moyenne de 15°C. En l'absence de soins sylvicoles et avec une forte densité de peuplement, Liquidambar présente toujours un tronc presque rectiligne ( $F = 2$ ), au détriment de la forme et de la taille de son houppier. Toutefois, dans un but de production de bois, il n'est pas nécessaire d'avoir des houppiers de bonne conformation et larges. Les sauvageons et les rejets de souches se développent aussi bien que les arbres-mères.

Les résultats de ce travail sont basés principalement sur les valeurs moyennes de la hauteur et du diamètre de Liquidambar et des données qualitatives comme l'index PHF. Ces données extrinsèques sont, certes, d'une importance capitale mais elles sont insuffisantes pour conclure sur la potentialité de l'espèce à être domestiquée et à compléter les besoins en bois. Dans l'objectif d'apporter des essences complémentaires de reboisement, il est recommandé de compléter ce travail par des études concernant la faculté de multiplication de l'espèce ainsi que les propriétés de son bois. Ces études seront abordées dans les chapitres suivant.

## CHAPITRE II : CAPACITE ET VARIABILITE DES PARAMETRES DE MULTIPLICATION ET CORRELATION DES VALEURS PARENTS-DESCENDANTS DE L'ESSAI DE PROVENANCES DE *LIQUIDAMBAR STYRACIFLUA* L. PLANTE A MANDRAKA

### I- INTRODUCTION

*Liquidambar styraciflua* L. (sweetgum, copalme d'Amérique ou Liquidambar) est un feuillus de la famille des Altingiaceae, originaire de l'est des Etats-Unis, du Mexique et de l'Amérique centrale (Carter et al, 1984). Aux Etats-Unis d'Amérique, l'amélioration génétique de Liquidambar a une certaine antériorité avec des actions qui ont commencé dans les années 1960 (Wright & Cunningham, 2008). Les étapes des travaux se sont succédées de la façon suivante : sélection de peuplements naturels, maîtrise de la germination et de la multiplication générative, installation de vergers à graines, tests de descendances et enfin multiplication végétative de l'espèce (Wright & Cunningham, 2008). Ces travaux ont été réalisés car le Liquidambar faisait partie des espèces feuillues à fort potentiel parmi les plus importantes essences des forêts du sud Est des USA. En Amérique Latine, elle est utilisée comme essence de reboisement, son bois étant par ailleurs bien valorisé (Kormanik, 1990)

L'étude de Carter & Hughes (1984), a rapporté que sur les quelques essais de plantations réalisés au Brésil, Chili, Pérou, Afrique du Sud et Zimbabwe, le *Liquidambar styraciflua* a montré un potentiel de croissance remarquable.

A Madagascar, c'est une espèce peu connue bien qu'elle ait été introduite depuis les années 1950. En 1986, le Commonwealth Forestry Institute (CFI) d'Oxford a organisé la mise en place d'essais multisites de provenances de Liquidambar à Xalapa (Mexique), Igazu, Colombo, Paraguaçu, Agudos (Brésil) et Mandraka (Madagascar). Ces essais sont restés ponctuels et l'espèce n'a pas encore été vulgarisée auprès des planteurs privés en dépit des besoins croissants en bois des populations malgaches.

Les résultats des travaux effectués sur cette espèce sur le territoire Nord Américain et en Amérique Latine montrent que cette espèce peut répondre aux principales priorités de choix d'adoption des essences à Madagascar. En effet, l'adoption d'une essence par les planteurs malgaches dépend, par ordre de priorité, de la vitesse de croissance, de l'usage multiple du bois, de sa capacité à rejeter, des qualités technologiques du bois, de la résistance de l'espèce au passage de feu,... (Chaix & Ramamonjisoa, 2001). Toutefois, la vulgarisation de cette espèce à Madagascar, comme ailleurs, passe aussi par les spécificités des graines (qualité germinative, stockage facile,...) et les possibilités de les produire facilement. De plus, les

résultats obtenus en Amérique Latine et aux USA pourraient ne pas être répétables à Madagascar du fait de l'adaptation spécifique des espèces forestières dans chaque zone d'introduction.

Pour le cas de Madagascar, caractérisé par une foresterie paysanne avec peu d'intrant, la multiplication par voie générative est la méthode la plus courante pour la production de jeunes plants destinés au reboisement. Dans ce sens, le SNGF (Silo National des Graines Forestières) est l'autorité désignée pour la mise en œuvre du Système de l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Economiques) pour la certification des matériels forestiers de reproduction. Le SNGF récolte et vend des semences forestières à vulgariser à Madagascar, dont Liquidambar fait partie.

La connaissance des conditions de germination des graines ainsi que de la croissance juvénile des plants constituent les conditions principales de réussite de cette multiplication. Dans ce sens, l'étude de Weinert et *al* (1990) a démontré que le taux de germination des graines des arbres fruitiers pouvait varier suivant des conditions climatiques, géographiques, édaphiques et génétiques de leurs arbres-mères. Les études de Bewley & Black (1982) ; Mayer & Polijakoff-Mayber (1989) ont confirmé cette variabilité de germination tout en mettant en évidence que l'eau, la qualité de l'air, la température, l'humidité et leurs interactions sont des facteurs primordiaux pour la germination des graines. Ainsi, chaque espèce requiert des conditions optimales spécifiques de germination de leurs graines.

Pour le cas de Liquidambar, Kormanik (1990) a montré qu'un fruit globuleux de Liquidambar pouvait contenir en moyenne 57 graines. La même étude a rapporté que cette productivité était très variable suivant la saison, la durée de la sécheresse et du stress hydrique subit par l'arbre-mère. En ce qui concerne la germination, Bonner (1970) a montré une valeur moyenne du taux de germination des graines non traitées, plantées dans la région du centre de Mississippi, autour de 81,3% à 30°C pendant 8h de jours et à 20°C pendant 16h de nuit.

Les résultats publiés jusqu'à maintenant proviennent uniquement des études menées aux USA et en Amérique latine. Dans le cadre d'une amélioration génétique et de vulgarisation de *Liquidambar styraciflua* à Madagascar, il s'avère donc indispensable d'étudier les facultés de multiplication générative et de croissance juvénile de cette espèce en fonction des conditions spécifiques rencontrées. Dans cet objectif, ce travail se propose (1) d'étudier la productivité grainière et la variabilité du taux de germination de Liquidambar de Mandraka, (2) d'évaluer la variabilité et la capacité de la croissance des jeunes plants, (3) d'estimer l'héritabilité de ces paramètres (germination et croissance juvénile) et (4) d'établir les corrélations entre les valeurs des parents et celles des descendants.

## II- MATERIELS ET METHODES

### 2-1- Matériels d'étude

L'étude de la germination et de la croissance juvénile a été axée sur neuf (9) des douze (12) provenances plantées dans le site (Tableau 9). Les neuf provenances ont été choisies suivant le rang le plus élevé de la valeur moyenne de la hauteur et de la circonférence.

Les graines de Liquidambar, issues d'une pollinisation libre, ont été collectées sur trois (3) pieds d'arbres de tailles différents (un dominant ou co-dominant de grande taille, un de moyenne et un de petite taille) issus de ces neuf (9) provenances et sur les quatre (4) blocs de répétition du site d'essai (soit 33 lots de graines : neuf (9) provenances sur le bloc I et III, sept (7) sur le bloc II et huit (8) sur le bloc IV). En effet, les blocs II et IV ne contiennent pas la totalité des provenances prises en compte dans cette étude (Figure 10). Pour un échantillonnage plus représentatif de l'ensemble de la plantation, nous avons fait le choix de récolter sur des arbres de tailles différentes. Les fruits issus de ces trois pieds ont été ensuite mélangés dans le but d'avoir un brassage génétique et d'éviter de prendre en considération l'effet que pourrait engendrer la taille des arbres sur la germination (Andrianaivo, 2009). Etant donnée la variabilité de la phénologie à travers les origines (Hicks & Reine, 1967), la récolte des fruits a été réalisée vers fin juillet 2011 pour qu'ils soient présents et à maturité pour toutes les provenances considérées.

Tableau 9: Caractéristiques des provenances considérées et du site d'essai

N°	Provenance	Origine	Longitude	Latitude	T°moy (°C)	Altitude (m)	Pluviométrie moyenne annuelle (mm)
4	Huatusco	Mexico	69°58'W	19°05'N	18,8	1350-1550	1746
5	Buenos Aires	Honduras	88°11'W	15°30'N	25,0	900-1080	2000
7	Tactic	Guatemala	90°21'W	15°19'N	17,3	1380-1420	2079,5
8	Finca las Victorias	Guatemala	89°22'W	15°12'N	22,4	800-1000	2000
9	Las Lajas	Honduras	87°34'W	14°48'N	21,4	1100-1200	1700
10	San Esteban	Honduras	85°35'W	15°22'N	21,0	640-800	1300-1500
11	Tutule	Honduras	87°50'W	14°12'N	17,0	1400-1700	1900
12	Los Alpes	Honduras	87°58'W	14°33'N	18,0	1250-1350	1400-1600
13	Yucul	Nicaragua	85°48'W	12°55'N	22,4	850-1100	1394
	Mandraka (essai)	Madagascar	47°55'E	18°54'S	17,5	1200	2300

T° moy : Température moyenne annuelle

## 2-2- Démarche de l'étude

### 2-2-1- Estimation de la productivité grainière et du poids de 1000 graines

La réussite de la fécondation des fleurs et la potentialité de production en graines d'un arbre peuvent être appréhendées par le taux de conversion graines/fruit (Steffan-Dewenter & Tschardt, 1999). Le poids de 1000 graines est, par contre, utilisé pour exprimer la masse, le degré de séchage et la maturité des graines. L'étude de Lacharme (2001) a montré que cette valeur pouvait varier selon les provenances. Ainsi, le poids de 1000 graines pourrait être considéré comme un critère de sélection dans les programmes d'amélioration génétique. Un fruit de Liquidambar est une capsule globuleuse et épineuse de 22 à 35 mm de diamètre avec de multiples petits lobes bicellulaires où se situent les graines (Kormanik, 1990). A maturité des fruits, les lobes éclatent et libèrent les graines.

Les fruits de liquidambar ont été collectés sur 99 arbres, blocs et provenances confondus. Afin d'isoler les provenances des arbres-mères, seul les fruits qui sont restés accrochés sur chaque pied d'arbre ont été récoltés. Pour le cas de notre étude, les fruits se trouvaient généralement sur la partie supérieure du houppier de chaque pied d'arbre. La récolte a donc été réalisée en grimpant sur l'arbre. Pour l'estimation de la productivité grainière et du poids de 1000 graines, les fruits ont d'abord été comptés dans chaque lot. Ensuite, les graines ont été extraites, séparément pour chaque lot et elles ont été pesées à 10<sup>-2</sup> gramme près. Enfin, 40 graines ont été tirées au hasard dans chaque lot et pesées à 10<sup>-2</sup> gramme près. Le poids de 1000 graines est ainsi estimé en extrapolant la masse de 40 graines pour 1000 graines. Le taux de conversion graines/fruit est, par contre, estimé à partir de l'équation (Equation 10) en utilisant les trois grandeurs (nombre de fruit, masse totale de graine et masse de 40 graines par lot).

$$\text{Equation 10) } Nb \left( \frac{\text{graines}}{\text{fruits}} \right) = \frac{\frac{\text{Masse totale graines par lot} \times 40}{\text{Masse 40 graines par lot}}}{\text{Nombre fruit par lot}} = (\text{Nombre graine lot})$$

### 2-2-2-Mise en place des essais de germination et de suivi de la croissance juvénile des descendance de Liquidambar

Afin de déterminer la condition propice à la germination des graines de l'essai de provenances de Liquidambar à Mandraka, quatre milieux de cultures différents ont été considérés et comparés (Tableau 10). Dans le but de mettre en évidence la potentialité des graines à germer le plus naturellement possible, elles n'ont subi aucun traitement ni ajout d'agents de préservation.

Tableau 10 : constitution et conditions de substrat d'essai de germination

Milieu	Agar	Sable BP (sable sur boîte de pétri)	Sable CG (sable dans chambre de germination)	Plate bande (PB)
Substrat	Solution d'agar à 10gl <sup>-1</sup>	Sable fin de rivière stérilisé		1-1-1 (1 unité de sol, 1 unité de sable fin et 1 unité de fumure)
Support	Boîte de Pétri		Bac plastique transparent	Pot plastique noir
Température	25°C		27°C	Condition naturelle
Exposition	Sous ombre		Lumière continue	Condition naturelle de jour et de nuit
Entretien	2 arrosages/semaine		Arrosage journalière	2 arrosages/semaine
Type d'essai	Essai au laboratoire			Essai au champ (pépinière)

Le choix de tester la germination du Liquidambar sur du sable et du substrat du type 1-1-1 s'est justifié par le fait qu'aucune étude de germination de cette espèce n'avait encore été réalisée sur ces types de milieu de culture. Les seules études de germination, publiées, menées par Bonner (1967) et Kormanik (1990), ont été effectuées dans de l'eau distillée placée dans des boîtes de Pétri.

Le dispositif de semis, pour les 4 milieux de culture, a été répété 4 fois avec 10 graines par répétition suivant les provenances et les blocs des arbres-mères (Figure 13, Photographie 11) comme l'exigeait la description de l'International Rules for Seed Testing (ISTA, 2007) (soit 1320 graines par milieu de culture : 33 lots x 4 répétitions x 10 graines). Des soins réguliers (désherbage et arrosage) ont été effectués périodiquement sur les plants de la plate bande en pépinière pendant les 10 premiers mois suivant le semis. Au-delà de cette période, le désherbage a été interrompu dans le but de confronter l'étude de Wright & Cunningham (2008), qui a rapporté que les jeunes plants de Liquidambar sont intolérants à la concurrence avec les autres plantes adventices. L'effet de la concurrence et de la réussite des conduites en pépinière ont été évalués à partir du taux de survie des plants. Ce taux a été obtenu par le rapport entre le nombre de plants vivants à un temps « t » avec le nombre initial des plants après la germination.

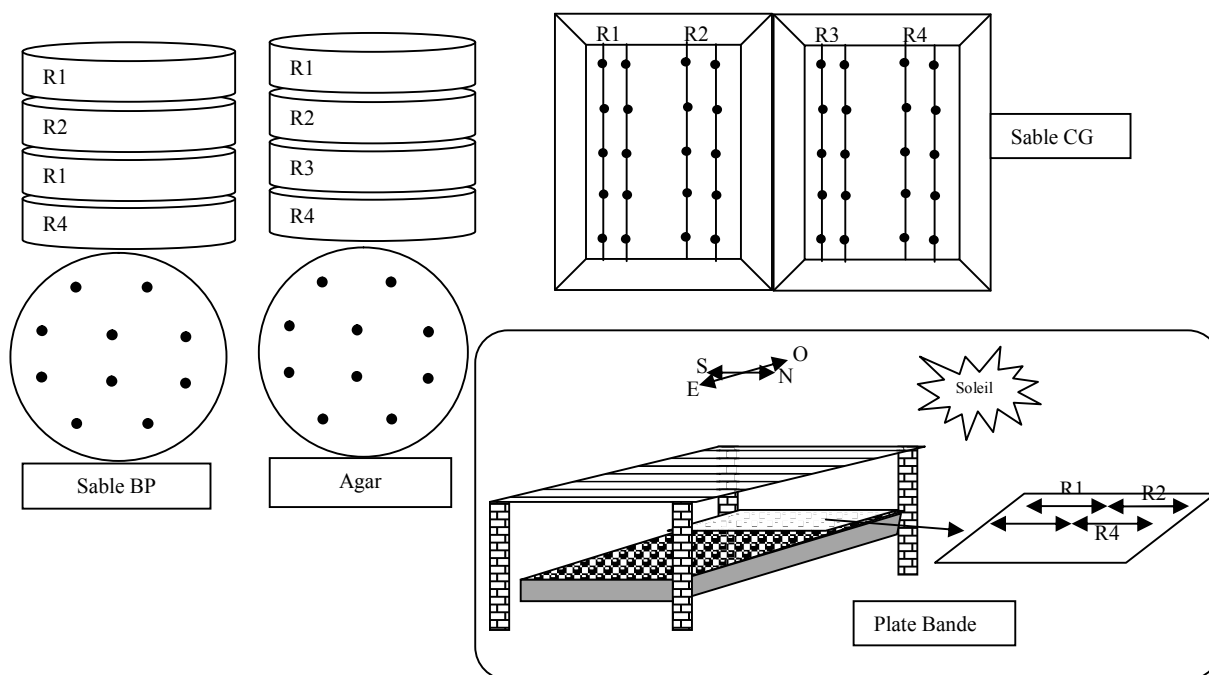
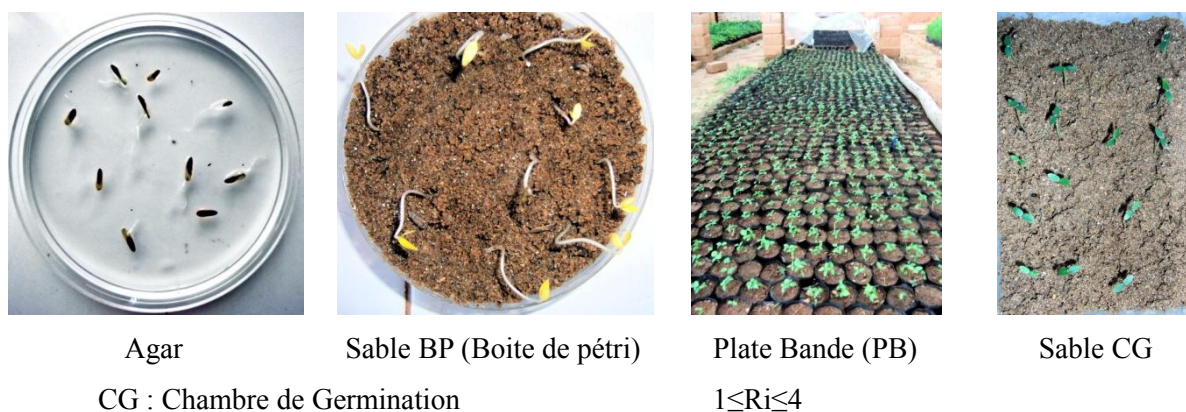


Figure 13 : Dispositif de semis des graines de Liquidambar



Photographie 11 : Dispositif de semis

(Source : Herizo Rakotovololonalimanana)

### 2-2-3-Evaluation de la vitesse de germination et de la germination

La vitesse de germination peut prendre différentes définitions selon le domaine et/ou l'auteur. Pour le cas du maïs par exemple, on la définit comme étant le temps nécessaire pour que 50% des graines germent (Anzala, 2006). Dans le cas d'une étude sur Kalanchoe, elle se définit comme étant le pourcentage des graines germées au bout de 6 jours de semis (Rabotovao, 2004). Dans le cadre de notre travail, il est difficile de suivre journalièrement l'évolution des graines dans le sable, alors il était plus judicieux d'utiliser la notion de vitesse

de germination adoptée par Rabotovao (2006), c'est-à-dire le taux de germination après 6 jours de semis.

La germination est définie comme étant l'émergence des organes essentiels qui indique l'aptitude de la graine à donner une plante satisfaisante dans les conditions favorables de pleine terre (ISTA, 2007). Dans cette étude, elle est évaluée en comptant les plantules, jugées viables, et qui ont pu émerger de leurs substrats. Ce comptage a été réalisé journalièrement jusqu'à 20 jours après semis.

#### 2-2-4-Mesures de la croissance juvénile des semis, des arbres-mères et des individus de l'essai de provenances

La croissance juvénile de Liquidambar est évaluée à partir des jeunes plants semés dans la plate-bande (PB). Neuf mensurations individuelles de la hauteur totale des plants ont été réalisées jusqu'à 425 jours après semis. Des mensurations de la hauteur totale des arbres mères et de tous les individus du site d'essai de provenance ont été réalisées à Mandraka lors de la récolte des graines en 2011. A part les données dendrométrique de 2011, les bases de données du DRFP-FOFIFA (Département de Recherche Forestière et Piscicole du FOFIFA) contenant les relevés annuels de la hauteur totale (années 1992 à 1999) et de la circonférence à 1,30 m (exprimée en diamètre) (année 1992 à 2008) ont été considérées dans cette étude.

#### 2-2-5-Analyse statistique des données

Des statistiques descriptives ont été utilisées pour décrire la production grainière, le poids de 1000 graines, la vitesse et le taux de germination des graines de Liquidambar et pour illustrer graphiquement les liaisons entre deux facteurs. Afin d'identifier les tests appropriés pour chaque type de comparaisons, le test de Shapiro-Wilk a été exécuté sous R (R Development Core Team, 2012) pour vérifier la normalité des variables considérées et le test de Bartlett pour l'identification de l'homogénéité de leur variance (Mouchirou, 2003; Saporta, 2006). Si la loi de probabilité des variables suit une loi normale et leurs variances sont homogènes, l'analyse de la variance (ANOVA ou AOV) a été alors utilisée pour la comparaison des moyennes des variables considérées. Dans le cas contraire, le test de Kruskal Wallis a été appliqué. La méthode de Holm a été ensuite utilisée pour mettre en évidence les différences entre moyennes des variables considérées de chaque provenance et bloc de répétition des arbres-mères. Le choix de cette méthode est justifié par le fait qu'elle intègre l'erreur de type 1 et donne une p-value ajustée (Ambroise, 2007) (ANNEXE 3).



Le paramètre du modèle statistique de l'analyse de variance est du type (Equation 11) :

$$\text{Equation 11)} \quad Y_{ijl} = \mu + B_i + P_j + R_l + (BP)_{ij} + (BR)_{il} + (PR)_{jl} + \varepsilon_{ijl}$$

Où

$i = 1, \dots, I$  ;  $j = 1, \dots, J$  ;  $l = 1 \dots L$

$Y_{ijl}$  : valeur phénotypique mesurée sur l'individu de provenance J sur le bloc I et dans la répétition L

$\mu$  : moyenne globale

B : effet du bloc des arbres-mères avec comme variance  $\sigma^2_B$

P : effet de la provenance avec comme variance  $\sigma^2_P$

R : effet de la répétition de mesure dans la plate-bande de variance  $\sigma^2_R$

BP : effet d'interaction bloc provenance avec comme variance  $\sigma^2_{BP}$

$\varepsilon_{ij}$  : résidus à effet aléatoire de variance  $\sigma^2_\varepsilon$

BR : effet de l'interaction bloc de répétition des arbres-mères et de la répétition de mesure de variance  $\sigma^2_{BR}$

PR : effet de l'interaction provenance et de la répétition de mesure de variance  $\sigma^2_{PR}$

Pour l'analyse de la variance de la germination, l'effet du substrat S a été ajouté à ce modèle qui s'est écrit comme suit (Equation 12) :

Equation 12)

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + P_j + S_k + R_l + (BP)_{ij} + (BR)_{il} + (PR)_{jl} + (BS)_{ik} + (SP)_{ij} + (SR)_{kl} + \varepsilon_{ijkl}$$

Où en plus des éléments de l'Equation 11

S : effet du substrat de variance  $\sigma^2_S$

R : effet de la répétition de mesure de variance  $\sigma^2_R$

SR : effet de l'interaction substrat et de la répétition de mesure de variance  $\sigma^2_{SR}$

BS : effet d'interaction bloc substrat de variance  $\sigma^2_{BS}$

SP : effet d'interaction Substrat Provenance de variance  $\sigma^2_{SP}$

$\varepsilon_{ijk}$  : résidus de variance  $\sigma^2_\varepsilon$

L'analyse de la variabilité génétique se traduit par une étude du contrôle génétique ou de l'héritabilité (au sens large et/ou au sens stricte) du caractère étudié. L'héritabilité au sens large ou hérabilité génotypique ( $h^2_G$ ) pour la germination et la croissance juvénile des jeunes plants à différents âge a été calculée à partir de l'analyse de variance (Tableau 11) et selon la formule de Nanson (1970) (Equation 13). L'héritabilité au sens large est la part de la variance due à la provenance par rapport à la variance totale. Ce dernier paramètre renseigne sur les proportions des caractères transmis par les parents à leurs descendants lors d'une multiplication générative, permettant alors de définir le niveau du contrôle génétique du caractère considéré.

Tableau 11 : Tableau d'analyse de variances

Sources	degré de liberté (ddl)	Carrés Moyens (CM)	F calculée
Provenances	J – 1	$\sigma^2_P (A)$	$\sigma^2_P / \sigma^2_\varepsilon$
Blocs	I – 1	$\sigma^2_B (B)$	$\sigma^2_B / \sigma^2_\varepsilon$
Résidus	(J-1)(I-1)	$\sigma^2_\varepsilon (C)$	
Total	IJ- 1		

J : nombre de provenances

I : nombre de répétitions (bloc)

Equation 13)

$$h^2_G = \frac{\sigma^2_P - \sigma^2_\varepsilon}{\sigma^2_P} = \frac{A - C}{A}$$

L'héritabilité au sens stricte des caractères de croissances de jeunes plants a été estimée suivant l'Equation 14 vue que les descendants sont composés de demi-frère (Polge & Illy 1968).

Equation 14)

$$h^2_A = 4t$$

Où t est le coefficient de corrélation intraclasse déterminé suivant l'Équation 15.

Équation 15)

$$t = \frac{\sigma^2_\gamma}{\sigma^2_\gamma + \sigma^2_\varepsilon}$$

Avec

$$\sigma^2_\gamma = \frac{A - C}{I}$$

Où

A : carré moyen factoriel au niveau des descendants ;

C : carré moyen résiduel au niveau des descendants ;

I : nombre de blocs (répétitions) au niveau des descendants.

La corrélation des valeurs parents-descendants a été obtenue en exécutant le test de corrélation de Spearman ou de Pearson (si distribution des variables suit la loi normale) suivant les résultats du test d'adéquation à la loi de distribution des variables. Cette corrélation a été réalisée grâce à la prise en compte des paramètres de multiplication de Liquidambar et de leurs variabilités, des caractéristiques dendrométriques des arbres-mères et de tous les individus de la plantation du site d'essai de provenances. Plusieurs auteurs ont utilisé ces paramètres pour évaluer la potentialité de croissance juvénile des arbres forestiers par rapports à leurs parents (Polge & Illy 1968 ; Cros, 1977 ; Nepveu & Birot, 1979 ; Kremer, 1986; Dlamini, 2000 ; Ngantsoue et *al*, 2005). Ce même test a été effectué au niveau des valeurs moyennes des hauteurs des jeunes plants de liquidambar à différents âge. Le test de chi deux a été utilisé dans ce travail pour connaître la signification des pourcentages de survie des jeunes plants selon les dates de mensuration des hauteurs et suivant les provenances.

### **III- RESULTATS ET DISCUSSION**

#### **3-1-Productivité grainière et poids de 1000 graines de Liquidambar de Mandraka**

Les fruits de Liquidambar, toute provenances confondues, contenaient en moyenne 22 graines (Tableau 12). Cependant, lors de la récolte des fruits sur leurs arbres-mères, la plupart de ses lobes ont éclatés, libérant une grande quantité de graines, sauf pour les provenances Huatusco et Finca Las Victorias pour lesquelles les fruits étaient encore verts au moment de la récolte. Pour ces deux provenances, le nombre moyen de graines par fruit est 71 (Tableau 12). Néanmoins, la possibilité de récolter des graines en une période sur les 9 provenances considérées veut dire que l'espèce s'est bien adaptée et la fructification a été meilleure. Le poids moyen de 1000 graines de Liquidambar de Mandraka était de 3,3 g avec un coefficient de variation moyenne de 13%.

Tableau 12: Rendement en graines par fruit de Liquidambar et poids de 1000 graines

	nombre graines/fruit toute provenance	nombre graines/fruit état vert	nombre graines/fruit état sec	Poids 1000 Graines (g)
Nombre de fruit	4354	436	3918	4354
Moyenne	22	71	16	3,3
Coefficient de Variation (%)	90	6	45	13
Ecart-type	20,3	4,3	7	0,4

Le liquidambar de Mandraka a produit davantage de graines par fruits (71 graines/fruits) que celui en Amérique qui était de 57 graines/fruits (Kormanik, 1990). De plus, le coefficient de variation du nombre de graines/fruits des fruits à l'état vert est très faible (Tableau 12). La valeur moyenne estimée du poids de 1000 graines (3,3 g) dans cette étude était significativement inférieure ( $p < 0,01$ ) à celui rapporté par (Kormanik, 1990 ; Rakotondraaelina & Rakotovao, 2005) qui était respectivement de 5,5 g et 6 g. La différence peut être due soit aux nombres d'échantillons soit à l'état des graines. En effet, la période de récolte des fruits a coïncidé au mois le plus sec (Juillet 2011) dans la région de Mandraka. Ainsi, il était possible que les graines qui sont à statut orthodoxe, perdent leur humidité à maturité pour conserver leur viabilité qui a été attestée par la bonne capacité de germination observée dans ce travail.

### 3-2-Vitesse de germination et germination des graines de Liquidambar de Mandraka

La vitesse moyenne de germination de Liquidambar sur Sable BP, Sable CG et Agar confondus est de 75%. Autrement dit, au bout de 6 jours de semis, 75% des graines semées ont germé. Le coefficient de variation de la vitesse de germination est très élevé (32,9%) signifiant qu'il existe des sources de variation de ce paramètre.

Le taux moyen de germination de Liquidambar sur Agar, Sable BP, Sable CG et Plate Bande est respectivement de 90%, 78%, 80% et 83%. Il est constaté que la germination est moyennement variable sur Agar (13,2%). Sur les trois autres milieux de cultures, la variabilité de la germination est élevée avec un coefficient de variation de 25,5%, 25,6% et 17% respectivement sur sable BP, Sable CG et Plate Bande. Dans l'ensemble, le taux de germination de Liquidambar de Mandraka est de  $83 \pm 17\%$  (Tableau 13). Le taux élevé de la germination de Liquidambar sur Agar est justifié et représente des conditions de germination optimales.

Tableau 13 : Taux de germination de Liquidambar

	Agar	Sable BP	Sable CG	Plate bande	Germination	Vitesse de germination
N	1320	1320	1320	1320	5280	3960
Moyenne (%)	90,4	78,4	80,4	83,3	82,9	75
Ecart-type	11,9	19,9	20,6	14,1	17,6	24,6
Coefficient de Variation (%)	13,2%	25,5%	25,6%	17%	21,1%	32,9%

*n : nombre de graines testées*

Le résultat de ce travail a démontré que la lumière n'influe pas sur la germination de Liquidambar (Tableau 13). Ce résultat coïncide bien avec ceux rapportés par Bonner (1967) et Association of Official Seed Analysts (1993) qui ont stipulé que la lumière n'a pas d'effet significatif sur la germination de Liquidambar. En effet, les quatre substrats ont été placés à une température presque similaire : 25°C pour agar et sable BP et 27°C pour sable CG. De plus, les mesures de température effectuées sur la plate-bande, durant la journée, ont donné une température moyenne de 25°C. Les résultats de germination effectuée par Bonner (1970), à 30°C pendant 8h de jour et 20°C pendant 16h de nuit ont donné des résultats similaires du taux de germination (81,3%) à ceux de notre étude (83%). Ainsi, pour que les graines de Liquidambar germent bien, il faut qu'elles soient mures, placées dans un endroit où l'humidité ne présente pas une grande variation et que la température se situe aux alentours de 25°C.

### 3-3-Variabilité et héritabilité de la vitesse de germination et de la germination des graines de Liquidambar

Les milieux de semis, les provenances, les blocs de répétitions des arbres-mères, et leurs interactions ont un effet significatif, au seuil de 1%, sur la valeur du taux de germination de Liquidambar de Mandraka (

Tableau 14). La comparaison deux à deux par la méthode de Holm a révélé que : (1) le taux de germination le plus élevé est celui du milieu Agar. Les valeurs moyennes du taux de germination sur les trois autres milieux ne sont pas significativement différentes ; (2) Le taux de germination des graines issues des arbres-mères du bloc I (toutes provenances et milieux de cultures confondus) est significativement plus élevé par rapport aux trois autres blocs et (3) les graines dont les arbres-mères sont issues des provenances Buenos Aires, Finca las Victorias et Tutul ont un taux de germination significativement plus élevé par rapport aux graines issues des autres provenances. San Esteban et Huatusco sont les provenances dont le taux de germination est le plus faible (ANNEXE 6).

Le classement des provenances de Liquidambar reste toujours invariable que ce soit sur la vitesse de germination ou pour la germination proprement dite. Le classement des blocs de répétition des arbres-mères sont les mêmes aussi suivant la valeur moyenne de la vitesse de germination et de la germination

La comparaison deux à deux des moyennes de la vitesse de germination suivant les blocs de répétition des arbres-mères et les provenances a révélé que les graines récoltées dans le bloc I montrent une vitesse de germination plus élevée que les trois autres (ANNEXE 6). Dans ce sens, les provenances, Buenos Aires, Finca Las Victorias et Tutul présentent toujours les moyennes de vitesse de germination les plus élevées et celle de Huatusco se situe au dernier rang. A partir des résultats d'analyse de variance, le paramètre vitesse de germination est fortement héritable ( $h^2_G = 0,92$ ) alors que le taux de germination est moyennement héritable ( $h^2_G = 0,61$ ) (

Tableau 14). Ainsi, nous en déduisons que l'environnement de l'arbres-mères, en l'occurrence la fertilité du sol, l'exposition au vent et au soleil pourraient contribuer à la variabilité de la germination. Ceci est encore vérifié par la faible valeur du coefficient de variation suivant les provenances. Il en est de même aussi pour l'effet du substrat. Les moyennes de la vitesse de germination et du taux de germination suivant les répétitions de mesure ne sont pas statistiquement différents. Ce qui signifie que chaque substrat est homogène et n'affecte pas sur la germination des graines de Liquidambar.

Tableau 14 : Variabilité de la vitesse et du taux de germination des graines de Liquidambar de Mandraka

Source de variabilité	Vitesse de germination		Germination	
	ddl	[CV(%)-Niveau de signification]	ddl	[CV(%)-Niveau de signification]
Substrat	2	7,9+++	3	6,3+++
Bloc	3	3,7+++	3	4,2+++
Provenance	8	5,6+++	8	4,3++
Bloc x Provenance	21	12,6+++	21	8,3+++
Substrat x Bloc	6	12,8+	9	7,8+++
Substrat x Provenance	6	14,9++	24	9,7+++
$h^2_G$	0,92		0,61	

+ : significatif au seuil de 5%, ++ : significatif au seuil de 1%, +++ significatif au seuil de 0,1%,

CV(%) : coefficient de variation en pourcentage,  $h^2_G$  : héritabilité génotypique, ddl : degré de liberté

La valeur moyenne, statistiquement plus élevée, du taux de germination du bloc I par rapport aux trois autres blocs, est expliquée par la différence de formation des graines selon les conditions climatiques et édaphiques. En effet, les conditions de température, de précipitation et de lumière pourraient, depuis la fructification jusqu'à la maturation des graines, avoir des effets sur leurs fertilité. De plus, la constitution complète des substances de réserve à l'intérieur des graines n'aurait lieu que si la température et la luminosité ou le photopériodisme, subies par les arbres semenciers, sont optimales (Ramamonjisoa, 1993). Comme le bloc I est moins exposé au vent et reçoit plus d'ensoleillement du fait de son orientation (Figure 10), alors, les conditions de formations de graines sont plus optimales. Par contre, les graines récoltées dans le bloc II, à quantité égale d'ensoleillement avec le bloc I mais plus exposées vents dominants de l'Est, montrent un taux de germination moins élevé que le bloc I. Le vent, pourtant sensé favoriser la dissémination des pollens pourrait perturber celui-ci s'il est trop violent. La fécondation et la formation des graines se trouvent ainsi perturbées. Le bloc IV, protégé du vent, reçoit moins d'ensoleillement (durant l'après midi). Ceci expliquerait que la formation des graines dans ces quatre blocs n'est pas la même et que les conditions du bloc I seraient plus propices incluant aussi la fertilité du sol. En effet, le sol des bas de pente est plus fertile que celui sur pente ou sur les crêtes. De plus, il a été rapporté que la croissance du Liquidambar était très réactive au phosphore et à l'azote (Chang, 2003, Rakotondraoelina & Rakotovao, 2005; Iversen & Norby, 2008). Ces deux éléments sont plus présents en bas-fonds et sont parmi les éléments minéraux importants pour la floraison et à la maturation des fruits (Bonner, 1994).

Plusieurs auteurs ont démontré que la germination des graines en zone d'introduction dépendait des provenances (Weinert et al, 1990 ; Dlamini, 2000 ; Moore & Lacey, 2009). Les résultats de ce travail sont conformes à ce que ces auteurs ont démontré. Dans notre étude, les graines récoltées sur un même arbre sont des demi-frères et résultent probablement de croisements intra provenance. En conséquence, si la contribution paternelle générale est sans doute biaisée pour les arbres pris individuellement, les effets maternels sont suffisamment importants pour distinguer des différences entre provenances.

### **3-4-Variabilité de la croissance juvénile du Liquidambar de Mandraka**

Les provenances, les blocs de répétitions des arbres mères et leurs interactions ont un effet significatif, au seuil de 0,1%, sur la valeur moyenne de la hauteur des jeunes plants de Liquidambar à différents âges sauf pour ceux âgés de 425 jours (Tableau 15). En d'autres termes, l'effet des blocs de répétition des arbres-mères s'est estompé avec l'âge des jeunes

plants. Ce résultat a été confirmé par la diminution progressive, avec l'âge, de la valeur du coefficient de variation de la hauteur des jeunes plants de Liquidambar suivant les blocs de répétition des arbres-mères. Ceci voudrait dire, qu'à partir de 425 jours ; (1) les valeurs individuelles des jeunes plants ne dépendent plus de la position des arbres-mères dans l'essai de provenance ou (2) les effets de compétitions entre les jeunes plants ont masqué l'effet bloc.

Pour l'effet provenance, la variabilité est de plus en plus marquée avec l'âge des plants (Tableau 15). Ceci permettrait de faciliter la sélection juvénile. Néanmoins, il peut s'agir également des effets de la compétition entre lots de plants qui augmenterait les différences entre lots. Le paramètre de croissance juvénile en hauteur des jeunes plants est fortement héritable ( $h^2_G$  0,73 à 0,95 et  $h^2_A$  0,25 à 0,70) et donc sous fort contrôle génétique (Tableau 15). Cette forte héritabilité renforce encore la possibilité de réaliser des sélections, au moins à cet âge, au niveau de la provenance en se basant sur la valeur de la hauteur des descendants de Liquidambar. Le comportement des descendants selon leur origine (provenance de l'arbre-mère) est une connaissance indispensable à la future sélection et à l'amélioration génétique du Liquidambar de Mandraka. Les résultats de la comparaison par la méthode de Holm de la hauteur moyenne des plants juvéniles a montré que les descendants originaires des provenances Buenos Aires, Huatusco, San Esteban et Yucul ont été les premiers à se distinguer (ANNEXE 6).

Les moyennes des hauteurs des jeunes plants de Liquidambar sont affectées par les répétitions. En effet, comme sur la Figure 13 du dispositif de semis sur plate bande, les répétitions ne sont pas exposées au soleil de la même façon. La partie Nord (répétitions 2 et 4) est plus exposée au soleil que la partie Sud (répétitions 1 et 3). La comparaison deux à deux de la moyenne des hauteurs des jeunes plants de Liquidambar a révélé que les plants sur les répétitions 2 et 4 sont statistiquement plus hauts que ceux de la répétition 1 et 3. Ce qui amène à dire que les jeunes plants ont une réaction positive vis-à-vis de l'exposition au soleil. Toutefois, le classement des provenances à l'intérieur des répétitions sont presque les mêmes à 320 et à 425 jours après semis. C'est-à-dire qu'il y a des classes de provenances qui ont une moyenne des hauteurs élevées (San Esteban et Los Alpes), intermédiaires (Tutul, Las Lajas, Yucul, Finca Las Victorias et Buenos Aires) et basses (Tactic et Huatusco) (ANNEXE 6).



Tableau 15 : variabilité et héritabilité de la croissance juvénile des descendants du Liquidambar de Mandraka

Source de variabilité	Croissance juvénile [CV(%)-Niveau de signification]									
	ddl	21 Jrs	32 Jrs	41 Jrs	57 Jrs	72 Jrs	86 Jrs	131 Jrs	320 Jrs	425 Jrs
Bloc	3	5,9+++	6,6+++	4,7+++	4,4+++	3,5+++	2,4+++	3,5+++	2,7+++	2,6NS
Provenance	8	6,6+++	4,7+++	3,2+++	4,4+++	3,4+++	3,2+++	3,7+++	8,1+++	6,7+++
Répétition	3	3,7+++	1NS	1,4+	1,9+	4,7+++	5,1+++	6,1+++	2,1NS	3,3NS
Bloc x provenance	21	13,4+++	8,9+++	8,8+++	7,8+++	7,6+++	6,1+++	6,6+++	9,4+++	10+++
Bloc x répétition	9	7,7+++	6,6++	4,7NS	4,4NS	4,8NS	4,6NS	6,1+	5,8++	4,7NS
Provenance x Répétition	24	7,4NS	5,2NS	3,4+	5,2NS	5,8+++	5,8+++	6,2+	8,3++	8,1NS
$h^2_G$		0,95	0,85	0,86	0,88	0,85	0,84	0,81	0,92	0,73
$h^2_A$		0,63	0,60	0,36	0,60	0,25	0,30	0,30	0,70	0,43

NS : non significatif, + : significatif au seuil de 5%, ++ : significatif au seuil de 1%, +++ significatif au seuil de 0,1%,

CV(%) : coefficient de variation en pourcentage,  $h^2_G$  : héritabilité génotypique,  $h^2_A$  : héritabilité génétique, ddl : degré de liberté

### 3-5-Taux de survie des jeunes plants de Liquidambar en pépinière

Jusqu'au 130<sup>ème</sup> jour après le semis, l'accroissement en hauteur des jeunes plants de Liquidambar se situe autour de 1 mm/jour (Tableau 16). Au-delà, l'accroissement diminue progressivement, ce qui pourrait suggérer une compétition entre plants. Le taux de survie en pépinière est de 93 % jusqu'à 320 jours après le semis. Une fois que le désherbage a été interrompu, le taux de survie a chuté brusquement pour descendre à 78% 425 jours après semis (Tableau 16). Les résultats des travaux de Wright & Cunningham (2008), stipulant que les jeunes plants de Liquidambar étaient très réactifs à la concurrence herbacée est confirmé par ce travail.

Tableau 16: Taux de survie et croissance des jeunes plants de Liquidambar en pépinière

Jours après semis	21	32	41	57	72	86	130	320	425
Croissance moyenne sur plate bande (cm)	2,1	2,9	4,1	5,4	6,8	7,3	11,2	16,2	20,5
Accroissement moyen en hauteur journalière (mm/jrs)	1,02	0,91	1,01	0,96	0,94	0,85	0,86	0,51	0,48
Pourcentage de survie sur plate bande (%)	100	99,6	99,1	99,2	99,2	98,5	98	93	77,8

Le test Chi deux de comparaison des proportions du taux de survie des jeunes plants a rapporté que ces proportions sont statistiquement différentes entre provenances, au seuil de 5%, de l'état initial à partir de 320<sup>ième</sup> jour de semis. À partir de cette période, les proportions du taux de survie sont statistiquement différentes, au seuil de 5%, suivant les provenances. A cet effet, la provenance Huatusco et Yucul ont montré un taux de survie inférieur à 60% après 425 jours de semis (Figure 14). De plus, nous avons constaté que les provenances avec une croissance rapide en hauteur ont un taux de survie plus élevé ; c'est-à-dire les individus dominant qui sont plus exposés au soleil (Figure 15). Ces résultats confirment encore soit la réactivité des jeunes plants de Liquidambar par rapport à la lumière évoqués précédemment ou l'effet de la compétition ou l'effet de leurs interactions.

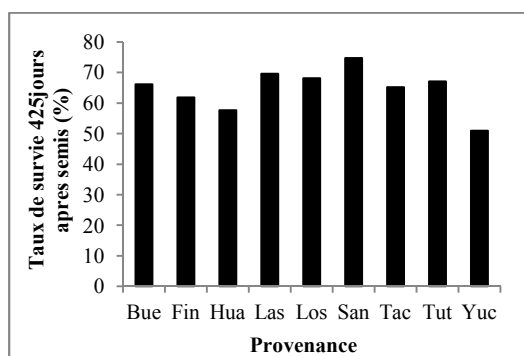


Figure 14 : Taux de survie à 425 mois des jeunes plants de Liquidambar suivant les provenances

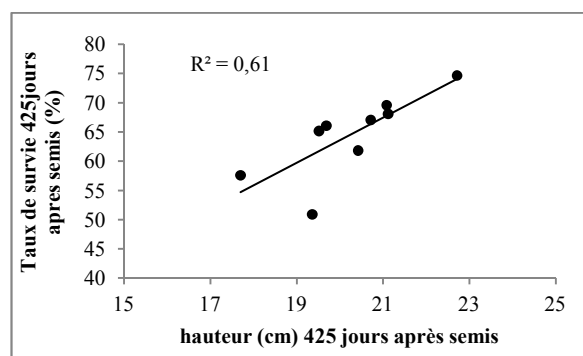


Figure 15 : Corrélations entre hauteur moyenne des provenances et taux de survie des jeunes plants de Liquidambar à 425 mois

### 3-6 Etude des corrélations

Une corrélation positive, significative au seuil de 5%, est observée entre les moyennes des hauteurs totales des arbres-mères et le taux de germination de leurs descendants en laboratoire et sur Agar (Tableau 17). Ainsi, les provenances dont la moyenne des hauteurs est plus élevée, produisent des graines plus fertiles. Les données relatives à la provenance Huatusco ont été ôtées lors de la réalisation du test de corrélation. Si cette provenance n'a pas été enlevée du test, aucune corrélation n'a été observée. Ce choix a été justifié par le fait que la provenance Huatusco se trouve sur une île, ainsi il était possible que le comportement de ses descendants puisse être différent par rapport au comportement des autres origines installées à Mandraka.

La corrélation positive significative entre le taux de germination en laboratoire et la hauteur des arbre-mère confirme ce que l'on avait suggéré avant sur l'importance de la

lumière sur la maturité et la fertilité des graines de Liquidambar (Tableau 17). D'ailleurs, les arbres de grande taille, dominants, ont reçu plus de lumière par rapport à leurs congénères (dominés). Les études de Khan (2004) sur *Artocarpus heterophyllus* et de Craven et al (2010) sur *Acacia koa* ont montré une corrélation positive significative entre la quantité de lumière reçue par l'arbre-mère et le taux de germination de leurs graines. Ainsi, *Liquidambar styraciflua* se comporte comme ces deux espèces.

En enlevant les descendants de la provenance Huatusco, une corrélation positive significative, au seuil de 5%, a été observée entre la moyenne des hauteurs des descendants à 425 jours et la moyenne des hauteurs de l'ensemble de la plantation des arbres-mères âgée de 6 ans. Ces résultats amènent à dire que les plants de Liquidambar ont des stratégies de croissance différentes. C'est-à-dire qu'il y a des espèces qui vont, au stade juvénile, développer leur système racinaire au détriment de la croissance en hauteur, et d'autres vont faire le contraire. Nos résultats sur la différence de stratégie de croissance des arbres à l'état juvénile corroborent avec les études rapportées par Fady (1988) sur le Cèdre de l'Atlas et le Sapin de Céphalonie, et de Cogliastro et al (2006) sur des peupliers.

Toutefois, il n'est pas encore possible de réaliser des sélections au stade pépinière étant donné l'instabilité de la classification des provenances au niveau de la descendance par rapport à celle des arbres-mères. De plus la hauteur moyenne de la plantation à 6 ans n'a pas enregistré une corrélation avec celle à 25 ans (Tableau 17) renforçant encore la différence de stratégies de croissances au niveau de chaque provenance ou groupe de provenances. Dans cette optique, Cros (1977) a rapporté que la période optimale de sélection était le moment où le classement des arbres-mères et de leurs descendants est stable et/ou identique. Par contre, il est possible de réaliser des sélections intra descendance et intra provenance étant données les variabilités observée à l'intérieur de chaque descendances et provenances.

Tableau 17 : Matrice de corrélation entre les valeurs des parents-descendants

Variables	H <sub>425 Jrs</sub>	H <sub>plant</sub>	H <sub>mère</sub>
H <sub>mère</sub>	0,00	<b>0,55*(+)/0,60 (SH)*(+)</b>	<b>0,49*(+)/0,57 (SH)*(+)</b>
Germ <sub>labo</sub>	0,00	<b>0,65**(+)/0,49 (SH)</b>	<b>(SH)*(+)</b>
Germ <sub>Agar</sub>	0,04	<b>0,72**(+)/0,59 (SH)*(+)</b>	0,25
H <sub>1992</sub>	0,29/ <b>0,76(SH)*(+)</b>	0,20/0,03 (SH)	0,07/0,06(SH)

*H<sub>320 Jrs</sub> : Hauteur moyenne des jeunes plants à 320 jours*

*CV<sub>320 Jrs</sub> : Coefficient de variation entre les demi-frères âgés de 320 Jours*

*CV<sub>C1,30m plant</sub> : Coefficient de variation de la circonférence à 1,30 m de la plantation*

*CV<sub>H Plant</sub> : coefficient de variation de la hauteur moyenne de la plantation*

*H<sub>plant</sub> : Hauteur moyenne de la plantation à 25 ans*

*H<sub>mère</sub> : Hauteur moyenne des arbres mère à 25 ans*

*H<sub>425 Jrs</sub> : Hauteur moyenne des jeunes plants à 425 jours*

*Germ<sub>labo</sub> : Moyenne du taux de germination sur les substrats AGAR, Sable BP et Sable CG*

*Germ<sub>Agar</sub> : Moyenne du taux de germination sur Agar*

*\* : corrélation significative au seuil de 5%*

*\*\* : corrélation significative au seuil de 1%*

*(+) : Corrélation positive*

*SH : Sans la provenance « Huatusco »*

*H<sub>1992</sub> : Hauteur moyenne de la plantation à 6 ans*

## CONCLUSIONS

Ce travail est basé sur l'essai de provenances de *Liquidambar styraciflua*, installé à Mandraka, composé de 4 blocs randomisés contenant 12 provenances, dont seules 9 ont été considérées ici. Les objectifs de ce travail consistaient principalement à étudier la productivité grainière de l'essai, et la variabilité des caractères de multiplication allant de la vitesse de germination jusqu'à la croissance juvénile des descendants de première génération. Tous ces caractères, comme la croissance et l'état sanitaire, traduisent la bonne adaptation de l'espèce selon son environnement d'introduction. Ceci dans le but de pouvoir vulgariser une espèce prometteuse et adaptée aux reboisements malgaches basés sur une sylviculture paysanne avec peu d'intrants. Les graines testées proviennent d'une pollinisation libre dont seuls les arbres mères sont connus et identifiés. Ce travail d'une durée de deux ans reposait sur : des mensurations, des comptages, des essais en laboratoire, des essais au champ et des analyses statistiques. Les résultats de ce travail ont permis de mettre en évidence certaines caractéristiques propres au lieu d'expérimentation et d'autres qui confirment des résultats montrés par ailleurs : les fruits de *Liquidambar* de l'essai de provenances de Mandraka contiennent davantage de graines par rapport à son aire naturelle de distribution. D'un point de vue général, les graines issues de l'essai de provenances ont montré une vitesse de germination de  $75 \pm 24\%$  et un taux de germination élevé  $83 \pm 17\%$ . Notre étude a montré que les graines issues des provenances Buenos Aires, Finca las Victorias et Tutul avaient une vitesse et un taux de germination significativement plus élevés par rapport aux autres graines issues de provenances de San Esteban et Huatusco. L'estimation de l'héritabilité a montré que ces deux paramètres sont très

héritable et moyennement héritable respectivement ( $h^2_G$  vitesse de germination = 0,92 et  $h^2_G$  germination = 0,61).

L'analyse de la croissance des plants a révélé que les provenances, les blocs de répétitions des arbres mères jusqu'à 425 jours et de leurs interactions affectent la croissance juvénile. L'effet provenance est d'autant plus marqué avec l'âge des jeunes plants. La croissance en hauteur des jeunes plants est un paramètre très héritable ( $h^2$  : 0,73 à 425 jours). Les descendants des provenances Buenos Aires, Huatusco, San Esteban et Yucul sont les plus vigoureux. Le taux de germination et la croissance des jeunes plants sont donc recommandés pour des sélections au niveau provenance pour les futures améliorations génétiques et la vulgarisation de cette espèce à Madagascar. Pour ce qui est de la réussite de la croissance en pépinière, les descendants de Liquidambar de Mandraka ont un taux de survie de 93% au bout d'une année si les soins en pépinière (arrosage et désherbage) sont bien effectués. Toutefois, cette réussite est très dépendante de ces soins car les jeunes plants sont très sensibles à la concurrence herbacée et à l'exposition au soleil. Cependant, nous avons montré que l'espèce se multiplie très bien en pépinière. De même, les semences de Liquidambar sont disponibles auprès du SNGF qui, non seulement joue un rôle de producteur, mais réalise aussi des essais d'expérimentation.

En ce qui concerne les corrélations de valeurs parents-descendants, les arbres-mères dont la hauteur moyenne est plus élevée (Buenos Aires, Finca Las Victorias) produisent des graines plus fertiles, stipulant qu'il est plus avantageux de travailler avec ces provenances. Parallèlement, vu la variabilité à l'intérieur des provenances, il est possible aussi de réaliser des sélections intra provenance couplé avec une sélection inter provenance.

L'étude menée montre que le Liquidambar est prometteur pour une utilisation en foresterie paysanne dans la région de Mandraka : forte capacité de multiplication, bonne croissance juvénile. Cependant, l'adoption et l'utilisation d'une espèce ne se limite pas seulement à la croissance et à sa multiplication. Il s'agit également de vérifier les qualités technologiques du bois produit, ce que nous allons aborder dans les chapitres suivants.

### **CHAPITRE III: VARIABILITE INTRA-ARBRE DES PROPRIETES PHYSICO-MECANQUES ET DURABILITE NATURELLE DU BOIS DE *LIQUIDAMBAR STYRACILFUA* L. AGES DE 23 ET 24 ANS PLANTES A MANDRAKA**

#### **I- INTRODUCTION**

Le bois est considéré comme un matériau naturel biologique indispensable à la vie de l'homme (Fleury & Chiche, 2006). L'emploi d'autres matériaux et l'arrivée de matériaux nouveaux a restreint l'utilisation du bois ; néanmoins, il reste toujours le premier matériau pour la menuiserie, les tonneaux, les caisses d'emballage et les traverses de chemins de fer (Guinard, 2009). 1,8 et 2 Md m<sup>3</sup> de bois sont utilisés dans le monde, respectivement comme bois de feu (47 % de la production mondiale) et bois de sciage (53% de la production mondiale) (FAO, 2007). Selon le même rapport d'étude, le bois de sciage est constitué à 23 % de feuillus et 77 % de résineux.

Le bois de Liquidambar (*Liquidambar styraciflua* L., ou Sweetgum ou Copalme d'Amérique) figure parmi les principaux feuillus les plus utilisés dans le sud des Etats Unis d'Amérique (USA). En effet, trente pour cent (30 %) des stocks de feuillus de la partie sud des USA sont constitués de Liquidambar (Carter & Hughes, 1984). De plus, la potentialité de production en biomasse de cette espèce est très élevée. Selon l'étude de Mattos et al (2001), un mélange de plantations de *Liquidambar Styraciflua* et de *Pinus caribaea* (variété hondurensis) de 10 ans, a produit 127 t/ha de biomasse totale. Selon la même étude, une plantation monospécifique de Liquidambar âgé de 11 ans, installée en Colombo (Brésil) avec un espacement de 2 m x 2,5 m, a produit 216,7 m<sup>3</sup>/ha de biomasse totale avec une masse volumique à 12 % de 489 kg/m<sup>3</sup>. L'étude de Shimizu & Spir (2002) avec du Liquidambar âgé de 11 ans, planté à Iguazu (Brésil), a montré que sa croissance en volume (40 m<sup>3</sup>/ha/an) était similaire à celle d'Eucalyptus. Aux USA, l'utilisation du bois de Liquidambar est très diversifiée ; elle va du placage, contreplaqué, menuiserie intérieure, aux traverses de chemins de fer (Kormanik, 1990). En Amérique Latine, le copalme d'Amérique est utilisé comme essence de reboisement et son bois est valorisé pour la fabrication de pâte à papier, palettes ou bois de charpente (Sabistina, 2010).

Le bois est un matériau naturel présentant des caractéristiques et des défauts qui doivent être compris et acceptés pour une utilisation donnée (American Hardwood Export Council, 2009). Cependant, la notion de qualité du bois est subjective et se réfère essentiellement à l'utilisation du produit final. L'étude de la qualité du bois fait appel aux domaines de recherche comme l'anatomie du bois, la physique du bois, la mécanique du bois, la chimie du bois, ....

Les propriétés du bois sont variables à l'intérieur de l'arbre (ou **intra-arbre**). Cette variation, de la moelle à l'écorce, du bas vers le haut du tronc, a des impacts sur ses utilisations. L'hétérogénéité du bois est globalement plus forte dans les directions radiale et tangentielle que dans la direction longitudinale (Clair, 2001). Le degré de variation des propriétés et des caractéristiques du bois est différent selon les trois directions du plan ligneux (Alteyrac, 2005).

Plusieurs auteurs ont montré ces variations sur des espèces de tailles et d'âge différentes (Zamudio et al, 2002 ; Baillères et al, 2005; Johnson & Gartner, 2006). Dans le cas du Liquidambar, les modèles de variations de la densité et de l'infradensité, rapportés par les différents auteurs, ne sont pas cohérents les uns par rapport aux autres et ne peuvent donc pas être généralisés. Webb (1964) a trouvé un effet important de la variation radiale de l'infradensité contrairement à celui observé par Jett & Zobel (1975). Hunter & Goggans (1968) ont avancé des modèles à la fois cohérents et incohérents de la variation radiale de l'infradensité. Webb (1964) n'a pas trouvé de différence d'infradensité du bois de Liquidambar suivant la hauteur alors que Carpenter & Hopkins (1966) en ont observé. Enfin, Shupe et al (1995) ont démontré, sur du bois de Liquidambar âgé de 40 ans, que le retrait diminuait de la moelle à l'écorce, à l'inverse de l'infradensité.

A Madagascar, *Liquidambar styraciflua* est une espèce peu connue et n'est pas encore utilisée par les populations locales bien qu'elle ait été introduite depuis les années 1950. En 1986, le Commonwealth Forestry Institute (CFI) d'Oxford a organisé la mise en place d'essais multisites de provenances de Liquidambar à Xalapa (Mexique), Igazu, Colombo, Paraguaçu, Agudos (Brésil) et à Mandraka (Madagascar). L'essai de provenances de Liquidambar de Madagascar a été installé à Mandraka, situé à 67 km à l'Est de la capitale en suivant la route nationale n°7. Le succès du bois de Liquidambar dans le sud des USA et les travaux effectués par Carter & Hughes (1984), rapportant les essais de plantation réalisés dans les tropiques (Brésil, Chili, Pérou, Afrique du Sud et Zimbabwe), ont montré un potentiel de croissance remarquable, laissant supposer que la plantation de Liquidambar à Madagascar, apportera une relance de la production de bois.

Cependant, étant donnés les modèles contradictoires de variation intra-arbre des propriétés (physiques, mécaniques, chimiques, ....) du bois de Liquidambar, il est fort possible que les modèles observés sur le Liquidambar planté à Mandraka ne soient pas les mêmes que ceux du Liquidambar des autres pays. De plus, les travaux de ces auteurs se sont axés principalement sur l'infradensité et le retrait alors que l'utilisation potentielle d'un bois ne peut pas être déterminée à partir de ces deux seules propriétés. Ce travail se propose alors : **(1)** de caractériser les principales propriétés physico-mécaniques et de durabilité naturelle du bois de Liquidambar de l'essai de provenance à Mandraka, **(2)** d'établir les corrélations entre ces propriétés, et de **(3)** modéliser les variabilités intra-arbres de ces propriétés dans une optique d'une meilleure utilisation et amélioration de son bois à Madagascar.

## **II- METHODOLOGIE**

### **2-1-Matériel d'étude**

Cinquante-quatre (54) plateaux diamétraux, provenant de 54 arbres d'éclaircies dont 27, âgés de 23 ans, abattus dans le bloc I (bas de pente) et 27, âgés de 24 ans, dans le Bloc III (sur la crête) ont été utilisés pour la détermination des propriétés physico-mécaniques et de durabilité naturelle du bois de Liquidambar. Les plateaux ont été découpés à 1,2 m au-dessus du sol suivant la ligne de pente du terrain ou l'inclinaison de l'arbre lorsque celui-ci était encore sur pied. Cette découpe a permis d'appréhender la présence du bois de tension sur le bois de Liquidambar. En effet, les études de Maeglin (1987), Jourez (1997), Clair (2001), Clair et *al*, (2004), Ruelle (2006) et Jaouen (2007) ont rapporté qu'il existe une différence entre les propriétés (physique, mécanique, chimique, anatomique,...) du bois normal et du bois de tension. De plus, ces variations affecteront ensuite la découpe et l'utilisation future du bois. Les éprouvettes ont été sciées tangentiellement aux cernes d'accroissement en allant de la moelle à l'écorce. Ce type de découpe a permis de prendre en compte l'anisotropie et la variation radiale des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar. Avant la découpe des éprouvettes, les cernes d'accroissement annuel ont été comptés visuellement et chaque éprouvette a été ensuite affectée à un âge cambial suivant sa position vis-à-vis de la moelle. La prise en compte de l'âge cambial nous aidera ensuite à établir les modèles de variation radiale des propriétés du bois. Au total, 297 éprouvettes ont été usinées et testées à partir des 54 plateaux.



## 2-2-Identification du bois de tension et du bois normal chez le bois de Liquidambar de Mandraka

Afin de vérifier la présence du bois de tension chez le bois de Liquidambar, étant donné que les échantillons ont été collectés sur des arbres inclinés de mauvaise conformation ou dominés et sur terrain en pente, une coloration macroscopique par le chloro-iodure de zinc a été réalisée sur des disques de son bois. Cette coloration peut être utilisée sur du bois clair et a déjà fait ses preuves sur du peuplier (Grzeskowiak et *al*, 1996). Ce réactif, selon la même étude, attaque les liaisons hydrogènes situées entre les chaînes de cellulose. L'iode responsable de la coloration pourra ainsi s'accumuler entre ces chaînes d'hydrogène (Jensen, 1962). Le bois normal se révèle alors en jaune et le bois de tension en mauve.

## 2-3-Détermination des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar

La masse volumique ( $\rho$ ), le module d'élasticité ( $E$ ), le module de cisaillement ( $G$ ), le module de rupture en flexion longitudinale ( $\sigma_F$ ), le module de rupture en compression axiale ( $C$ ), la dureté Monnin ( $N$ ), le retrait radial ( $R_r$ ) et tangentiel ( $R_t$ ), l'infradensité (Infra) et le Point de Saturation des Fibres (PSF) ont été les paramètres physico-mécaniques du bois considérés et mesurés dans cette étude (Tableau 18).  $E$  et  $G$  ont été estimés par analyse vibratoire avec le dispositif BING® (Beam Identification for Nondestructive Grading) version 2009 développé par le CIRAD. Les travaux de Brancheriau & Baillères (2002) ont rapporté que le  $E$  obtenu par analyse vibratoire avec l'outil BING® est statistiquement le même que le  $E$  mesuré par flexion suivant la norme NF EN 408+A1. De plus, le temps imparti à la réalisation des essais dynamiques et les incertitudes de mesure sont réduits avec l'utilisation de l'outil BING®. Le module de rupture en flexion longitudinale ( $\sigma_F$ ) du bois de Liquidambar a été déterminé par flexion 4 points suivant la norme NF B 51 008. Le module de rupture en compression axiale est calculé suivant la norme NF B 51 007. La dureté Monnin ( $N$ ) est estimée suivant la norme NF B 51 013. Pour ce faire, la largeur de l'empreinte «  $a$  » a été mesurée par analyse d'image. La machine d'essai universelle ADAMEL LHOMAGRY DY 36 (MTS DY36D) à pilotage électrique a été utilisée pour le montage du dispositif de la flexion 4 points, de la compression axiale et de la dureté Monnin. Les retraits (radial et tangentiel) ont été mesurés suivant la norme NF B 51 006. Le retrait a été calculé selon les équations (Equation 16) et (Equation 17) et en utilisant les dimensions des éprouvettes à l'état saturé et anhydre et suivant le sens radial et tangentiel.

Equation 16) 
$$R_r = \frac{L_{RS} - L_{RO}}{L_{RS}} \times 100 \text{ (en \%)}$$

Et

Equation 17) 
$$R_T = \frac{L_{TS} - L_{TO}}{L_{TS}} \times 100 \text{ (en \%)}$$

$L_{RS}$  et  $L_{TS}$  sont les dimensions des éprouvettes à l'état saturé

$L_{RO}$  et  $L_{TO}$  sont les dimensions des éprouvettes à l'état anhydre

Le PSF a été obtenu en traçant une fonction de droite «  $y = ax + b$  » à partir des dimensions des éprouvettes conditionnées pour que les humidités soient proches de 18%, 12%, 6% et 0%. La surface de l'éprouvette est prise comme axe des abscisses. Les points considérés sont la surface saturée moins la surface à chaque étape de conditionnement (humidité à 18, 12, 6 et 0%). L'humidité du bois est prise comme axe des ordonnées. Ainsi, le PSF est la valeur de l'humidité du bois où la valeur de l'abscisse est nulle ( $b = 0$ ). Dans la définition du PSF, le retrait longitudinal devrait être pris en compte, cependant il était relativement faible ; ainsi la surface a été prise en compte au lieu du volume. L'infradensité du bois de Liquidambar a été obtenue en faisant le rapport entre la masse anhydre des éprouvettes et leur volume saturée. Le volume saturé a été mesuré à l'aide du principe de poussée d'Archimède et la masse avec une balance d'une précision de  $10^{-2}$ g.

## 2-4-Classification de la croissance suivant les valeurs du diamètre

Les travaux de Bouffier, (2008) et de Jeffries (2008) ont rapporté que la masse volumique diminue suivant la croissance des arbres. De plus, Montes et al (2006) ont rapporté que le sens et la force de la corrélation entre les valeurs des propriétés physico-mécaniques sont quelque fois dépendants de la vitesse de croissance des arbres. Afin de prendre en considération cette différence de vitesse de croissance des arbres et les effets de corrélation qui en découleront, nous avons décidé de répartir les éprouvettes en trois catégories suivant les valeurs de diamètre des arbres dont elles ont été extraites. A cet effet, il y a la classe des arbres à « croissance lente » = diamètre inférieur ou égal à 30 cm, la classe des arbres à « croissance moyenne » = diamètre compris entre 30 cm et 40 cm inclus et enfin la classe des arbres à « croissance rapide » = diamètre supérieur à 40 cm.

## 2-5- Détermination de la durabilité naturelle du bois de Liquidambar

La durabilité du Liquidambar a été déterminée vis-à-vis des termites *Reticulitermes flavipes* (ex. *santonensis*) selon le protocole de la norme EN 117. Les éprouvettes à tester ont

été placées dans une micro-termitière pendant 8 semaines. Chaque micro termitière est composée de 250 termites ouvriers (hors spécimens en période de mue, blessés ou immobiles), de 4 à 5 soldats et de 4 à 5 nymphes.

Selon Lukmandaru & Takahashi (2008), sur le teck, la durabilité naturelle vis-à-vis des termites est dépendante de l'âge. Etant donné que les arbres dans notre étude sont quasi-équienens (23 ans pour le bloc I et 24 ans pour le bloc III), il n'a pas été possible d'évaluer la durabilité naturelle en fonction de l'âge. C'est l'effet de la densité qui a été étudiée. Pour ce faire, trois éprouvettes de forte densité (supérieur à 0,7 à 0,8), trois éprouvettes de moyenne densité (0,6 à 0,65) et trois éprouvettes de faible densité (0,5 à 0,55), soit neuf éprouvettes au total ont été soumises aux attaques des termites. . La durabilité naturelle du bois vis-à-vis des termites a ensuite été déterminée suivant la valeur de la cotation visuelle et la perte de masse dues aux attaques des insectes.

*Coriolus versicolor*, responsable de la pourriture fibreuse et *Coniophora puteana*, responsable de la pourriture cubique ont été choisis pour la détermination de la durabilité naturelle vis-à-vis des champignons. Les procédures expérimentales sont tirées de la norme XP CEN/TS 15083-1. Cinquante-huit (58) éprouvettes non traitées et non délavées ont été soumises aux attaques de *Coniophora puteana* et 57 aux attaques de *Coriolus versicolor* pendant 16 semaines. Afin d'avoir une classification globale de la durabilité naturelle du bois de Liquidambar, 78 éprouvettes ont été délavées parmi lesquelles 49 et 29 ont été soumises respectivement aux attaques de *Coniophora puteana* et *Coriolus versicolor* pendant 16 semaines. Le délavage, simulant la pluie, permet d'évaluer la durabilité naturelle d'un bois mis en œuvre en extérieur. Les processus de délavage ont suivi la norme NF EN 84. Les éprouvettes soumises aux attaques des champignons ont été découpées de la moelle à l'écorce afin d'apprécier la variabilité radiale de la durabilité naturelle du bois de Liquidambar. En plus des échantillons testés, 20 éprouvettes d'aubier de pins sylvestres et 23 éprouvettes de hêtre, de même dimension que celles de Liquidambar, ont servi de témoins pour évaluer la virulence des termites et des champignons.

La durabilité naturelle du bois vis-à-vis des champignons Basidiomycètes a été évaluée par le pourcentage de perte de masse due aux attaques des champignons (Equation 18). Cette équation est obtenue en considérant l'Equation 19 et l'Equation 20.

Equation 18)

$$e = \frac{m_i - m_3}{m_i} (\%)$$

$m_3$  : masse sèche finale éprouvette essai (après 16 semaines et passage à l'étuve à 103°C)

$m_i$  : masse sèche initiale éprouvette essai, estimée suivant l'équation (Equation 19).

Equation 19)

$$m_i = m_{1e} \times \frac{100}{100 + MC} (g)$$

$m_{1e}$  : masse initiale éprouvette essai (ou masse de l'éprouvette avant essai stabilisée sous une condition climatique de 20°C de température et de 65 % d'humidité relative).

MC : moyenne du teneur en humidité (calculée à partir de le teneur en humidité des éprouvettes destinées au calcul du teneur en humidité selon l'équation « Equation 20 »)

Equation 20)

$$MC = \sum mc (\%)$$

Où  $mc = \frac{m_1 - m_0}{m_0} (\%)$

mc : teneur en humidité des éprouvettes de calcul d'humidité

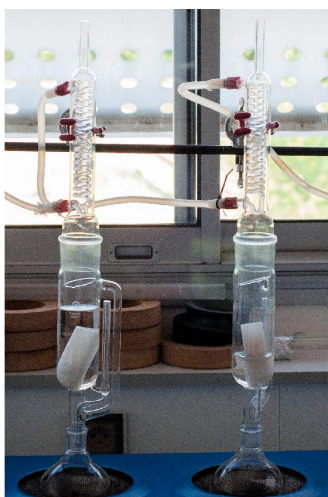
$m_1$  : masse initiale des éprouvettes de calcul d'humidité

$m_0$  : masse anhydre des éprouvettes de calcul d'humidité

## **2-6-Détermination du taux d'extractibles du bois de Liquidambar**

Afin d'estimer la quantité d'extractibles que contient le bois de Liquidambar à Mandraka, 6 éprouvettes, choisies suivant la valeur de leurs masses volumiques ont été utilisées (valeur faible de 0,5 à 0,55, moyenne de 0,6 à 0,65 et forte de 0,7 à 0,8 de la masse volumique).

L'extraction a été réalisée en Soxhlet en utilisant 150 ml d'éthanol et 50 ml de toluène par échantillon pendant 8 heures (Photographie 12). Après évaporation, la quantité d'extractibles a été évaluée par pesée et rapportée à la quantité de sciure (après broyage) utilisée (Photographie 13).



Photographie 12: Extraction de *Liquidamba styraciflua* par la méthode de Soxhlet



Photographie 13 : Sciure de Liquidambar avant extraction (dans les sachets plastiques) et après extraction (dans les boîtes de pétris)

Tableau 18 : Récapitulatif des propriétés du bois de Liquidambar considérées dans cette étude

Paramètres	Norme	Nombre éprouvettes	Dimension éprouvettes (LRT) (mm)	Outil de mesure principal	Outil de mesure accessoire
Masse volumique ( $\rho$ )	NFB 51 005	233	360 x 20 x 20	Pieds à coulisse + balance ( $10^{-2}$ g près)	
Module d'élasticité (E), Module de Cisaillement (G)	Essai dynamique	236		BING® version 2009	Pieds à coulisse ( $10^{-2}$ mm près) + balance ( $10^{-2}$ g près)
Module de rupture en flexion longitudinal 4 points ( $\sigma_F$ )	NF B 51 008	262		Machine d'essai universelle ADAMEL LHOMAGRY DY 36 (MTS DY36D) à pilotage électrique	Pieds à coulisse ( $10^{-2}$ mm près)
Module de rupture en compression axiale ( $\sigma_C$ )	NF B 51 007	271	60 x 20 x 20		
Dureté Monnin (N)	NF B 51 013	283	360 x 20 x 20		Largeur de l'empreinte « a » mesurée par analyse d'image
Point de Saturation des Fibres (PSF), infradensité (Infra), retrait radial (Rr) et tangentiel (Rt)	NF B 51 006	286	10 x 20 x 20	Enceinte climatique + dispositif de mesure par poussée d'Archimède	Comparateur ( $10^{-3}$ mm près), balance ( $10^{-2}$ g près), machine sous vide, étuve
Délavage	NF EN 84	78	60 x 25 x 15	Eau déminéralisée	
Durabilité naturelle aux attaques des termites	EN 117	9	60 x 25 x 15	Colonies de termites du genre Reticulitermes	
Durabilité naturelle aux attaques des champignons	XP CEN/TS 15083-1	193		Culture pure de <i>Coriolus versicolor</i> et <i>Coniophora puteana</i>	

L : Longitudinal

R : Radial

T : Tangentiel

## **2-7-Analyses statistiques et traitement des données**

Dans cette étude, des statistiques descriptives ont été utilisées pour décrire les propriétés physico-mécaniques et de durabilité naturelle du bois de Liquidambar. Ensuite, le test de Shapiro-Wilk a été exécuté pour vérifier l'adéquation à la loi normale des variables considérées (Mouchiroud, 2003 ; Saporta, 2006). La corrélation entre les paramètres considérés a été obtenue avec le test de corrélation de Pearson si la distribution des variables était normale ou le test de Spearman dans le cas contraire. L'analyse de la variance (ANOVA ou AOV) a été utilisée pour la comparaison des moyennes des propriétés physico-mécaniques suivant les classes de diamètre dans le cas où la loi de distribution de variables est normale ; dans le cas contraire, c'était le test de Kruskal Wallis qui a été utilisé. Pour la modélisation de la variabilité intra-arbre des propriétés physico-mécanique et de durabilité naturelle du bois de Liquidambar, des analyses de régression linéaire et logarithmique ont été exécutées avec l'âge cambial des éprouvettes comme variable explicative (ANNEXE 3). Les calculs ont été effectués avec le logiciel R, version 2.15.3 (R Development Core Team, 2012).

## **III- RESULTATS ET DISCUSSION**

### **3-1-Propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar**

Les résultats des essais physiques et mécaniques sur le bois de Liquidambar de Mandraka montrent que son bois est classé parmi les bois mi-durs, mi-lourds et moyennement rigides. Les résistances en flexion et en compression sont respectivement moyennes à faible. Le retrait (radial et tangentiel) est par contre élevé. Les propriétés physiques (masse volumique, retrait radial ou tangentiel, infradensité, dureté et PSF) sont faiblement à moyennement variables tandis que les propriétés mécaniques (module d'élasticité, module de cisaillement, module de rupture en flexion et en compression) sont moyennement à fortement variables (Tableau 19) (ANNEXE 4).

Tableau 19 : Propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar de Mandraka

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (Mpa)	G (Mpa)	$\sigma_F$ (Mpa)	C (Mpa)	N	Rr (%)	Rt (%)	infra	PSF (%)
Nombre d'éprouvettes	233	236	235	262	271	283	286	286	286	254
Moyenne	665,8	15 471,5	951,4	103,3	45,3	2,7	5,48	12,43	0,518	34,2
Ecart-type	48,9	2 844,7	186,7	25,6	6,1	0,7	0,57	1,15	0,038	2,5
Coefficient de variation (%)	7,3	18,4	19,6	24,7	13,5	25,3	10,55	7,91	7,35	7,3
Minimum	544,5	6 831,0	519,0	0,0	20,5	1,3	4,08	10,24	0,414	29,1
Maximum	777,7	23 218,0	2 197,0	152,6	66,9	6,5	7,13	17,99	0,59	48,1

*E* : module d'élasticité*G* : module de cisaillement $\sigma_F$  : Module de rupture en flexion 4 points*C* : Module de rupture en compression axiale*N* : dureté Monnin*n* : nombre d'échantillon*Rr* : retrait radial*Rt* : retrait tangentiel*Infra* : infradensité*PSF* : point de saturation des fibres

Les valeurs des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar à Mandraka, âgé de 23 ans (bloc I) et 24 ans (bloc III), sont supérieures ou du même rang que celles rapportées par les différents auteurs sur la même espèce (Tableau 20). Cependant, les propriétés physico-mécaniques de Liquidambar planté à Mandraka sont moins variables par rapport aux résultats rapportés par Carpenter & Hopkins (1966), Johnson (1985) ; Faust et *al* (1990) ; Mattos et *al*, (2001). Cette différence de variabilité peut être due à la différence d'âge entre les échantillons. En effet, tous les échantillons de ces auteurs, où nous avons pu trouver l'écart-type des valeurs des propriétés, proviennent d'un peuplement naturel (ou non planté) où l'âge des arbres, même s'ils sont de la même espèce peuvent être très variables. Dans ce sens, les études de Zobel et *al* (1989) ; Maeglin (1987) ; Jeffries (2008), ont confirmé que les propriétés physico-mécaniques de l'arbre sont affectées par leur âge, d'où la forte valeur du coefficient de variation. Dans notre travail, l'essai de provenance de Mandraka est constitué d'individus quasi-équiens. Ainsi, nous pouvons en tirer que les propriétés physico-mécaniques des bois provenant d'une plantation quasi-équienne comme celle de Mandraka sont moins variables que les mêmes propriétés pour cette même essence dans une forêt non plantée et dont les individus seraient d'âges différents.

Cette étude a démontré que le bois de Liquidambar à Mandraka a une masse volumique plus élevée que le Liquidambar collecté dans son aire naturelle de distribution (Johnson, 1985) et que le Liquidambar de 10 ans planté en Colombo (Brésil) (Mattos et *al*, 2001). Les bois de Liquidambar de Mandraka et ceux du delta de Mississipi âgés de plus de 47 ans, présentent les mêmes valeurs moyennes de l'infradensité (Carpenter & Hopkins, 1966). Par contre, les bois de Mandraka sont plus denses que ceux des bois décrits par



Johnson (1985). Le module d'élasticité de Liquidambar de Mandraka est largement supérieur et moins variable que celui des bois de Liquidambar de Caroline du Nord (USA) (Faust et *al*, 1990). Les valeurs moyennes du module de rupture en compression axiale obtenues dans cette étude et celui obtenu par Faust et *al* (1990) sont du même ordre de grandeur. Par rapport aux propriétés physico-mécaniques rapportées dans les différentes études sur le Liquidambar, dans d'autres pays, la région de Mandraka semble constituer une zone où les propriétés du bois sont meilleures.

Tableau 20 : Comparaison des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar de Mandraka par rapport à celles rapportées par les autres auteurs

Propriétés	Liquidambar à Mandraka (valeur moyenne)	Autre Liquidambar	Source	Description de l'espèce
Infradensité	0,52 ± 0,04 CV=7,4%	0,51	Carpenter & Hopkins (1966)	Liquidambar supérieur à 47 ans du delta de Mississippi, condition optimum de développement
		0,46	Johnson (1985)	Bois mature supérieur à 40 ans dans son aire naturelle de distribution
Module d'élasticité	15 000 ± 2800Mpa CV=18,4%	11 652 ± 2964 Mpa CV=25,4%	Faust et <i>al</i> (1990)	Caroline du Nord
Module de rupture en compression axiale	45,3 ± 6 Mpa CV=13,5%	42,7 ± 15,23Mpa CV=35,6%		
Masse volumique	665,8 ± 48,9 Kg/m <sup>3</sup> CV=7,3%	519 Kg/m <sup>3</sup>	Mattos et <i>al</i> (2001)	Liquidambar plantée à Colombo, Brésil de 10 ans
		576,6 Kg/m <sup>3</sup>	Johnson (1985)	Bois mature supérieur à 40 ans dans son aire naturelle de distribution
Retrait radial	5,6 ± 0,57% CV=11%	5,4%	Mattos et <i>al</i> (2001)	Liquidambar de 10 ans plantés à Colombo, Brésil
Retrait tangential	12,4 ± 8% CV=9,34%	12,7%		

### 3-2-Taux d'extractibles du bois de Liquidambar

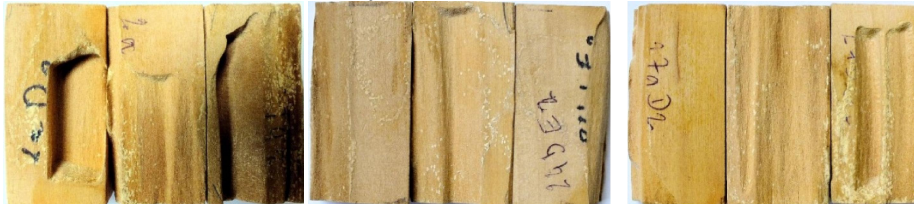
Le taux moyen d'extractibles du bois de Liquidambar de la Mandraka avec du toluène/éthanol est de  $1,1 \pm 0,5\%$  de la masse sèche totale. La classe de masse volumique que nous avons prise en compte lors de l'échantillonnage n'a pas d'effet sur le taux d'extractible. Par rapport aux taux d'extractibles des autres essences feuillus, celui de Liquidambar est très faible (Tableau 21).

Tableau 21 : Quantité d'extractibles de quelques essences par rapport à celle de *Liquidambar styraciflua*

Essence	Taux d'extractibles (%)	Source
Ordre de grandeur pour les Résineux (Pays tempéré)	3 +/- 2	Sjöström, 1993
Ordre de grandeur pour les Feuillus (Pays tempéré)	5 +/-4	
<i>Eucalyptus globulus</i>	5,1	Ona et al, 1998
	6	Poke et al, 2006
<i>Tectona grandis</i>	6	Narayanamurti et al, 1962
	2 ans	
	10	
<i>Liquidambar Orientalis</i>	23 ans	Terzi et al, 2012
	15	
<i>Liquidambar styraciflua</i> à Mandraka	50 ans	
	2,5	
	1,1	

### 3-3-Durabilité naturelle vis-à-vis des termites

Le bois de Liquidambar de Mandraka est considéré comme non durable vis-à-vis des attaques des termites. L'évaluation visuelle des éprouvettes en fin d'essai a révélé que toutes les attaques sont fortes. Ainsi, la cotation équivalente est de 4 (Photographie 14). Le pourcentage de perte de masse, même si ceci n'est pas mentionné dans la norme EN 117, a montré une tendance de variation des pertes de masse suivant la valeur de la masse volumique. De plus, une corrélation négative significative a été observée entre les pertes de masses par les termites et les valeurs de la masse volumique. Dans ce sens, les bois les moins denses ont perdu beaucoup plus de leur poids que ceux qui sont plus denses (Figure 16). Cette corrélation s'explique par le fait que les termites privilégient les bois plus tendres (moins denses). En effet, la dureté et la masse volumique du Liquidambar sont corrélées positivement (Tableau 23). De plus, sur la (Photographie 14), on aperçoit bien que les termites ont attaqué la partie la plus tendre des cernes de chaque éprouvette.

	Moins dense			Moyennement dense			Plus dense		
									
Perte de masse (%)	12,82	11,14	13,37	8,64	7,97	6,24	7,72	6,66	7,21
Taux de survie de la colonie fin essai (%)	59,6	55,2	62	62,8	46,8	54,4	60,8	49,6	62,8
<b>Témoins de virulence (Hêtre)</b>	<b>T1</b>			<b>T2</b>			<b>T3</b>		
Perte de masse (%)	34,03			12,10			27,74		
Taux de survie de la colonie fin essai (%)	61,6			64			57,6		

Photographie 14 : Attaques de termites sur le bois de Liquidambar après 8 semaines

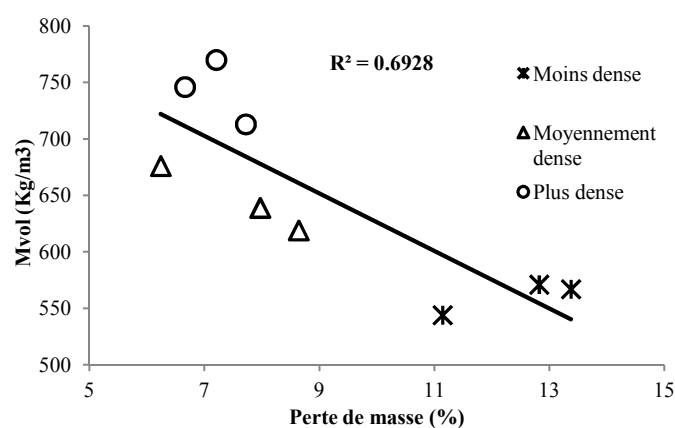


Figure 16: Corrélation entre perte de masse due aux attaques de termites et masse volumique

### 3-4-Durabilité naturelle par les champignons

Paradoxalement, le délavage a permis au bois de Liquidambar de perdre moins de bois vis-à-vis des attaques des champignons *Coriolus versicolor* (Cv). Cependant, le bois non délavé, tout comme le bois délavé, sont classés parmi les bois non durables d'après la valeur de la médiane de la perte de masses dues aux attaques de ces deux champignons. Les pertes de masses occasionnées par *Coriolus versicolor* et *Coniophora puteanea* sur les éprouvettes délavées ont été inférieures à celles des éprouvettes non délavées. Ceci peut probablement être imputé à la virulence de la souche au moment de l'essai (Tableau 22).

Tableau 22: perte de masse du bois de Liquidambar

	<i>Coriolus versicolor</i>				<i>Coniophora puteana</i>			
	Délavé		Non délavé		Délavé		Non délavé	
	Ls	Tv	Ls	Tv	Ls	Tv	Ls	Tv
n (nombre d'éprouvettes)	29	10	57	10	49	11	58	10
Perte de masse moyenne (%)	23,2	20,2	35,2	30,9	28,5	33,5	28,7	38,7
Perte de masse médiane (%)	20,6	20,1	36,3	31,3	28,2	30,4	28,3	38,4
Ecart-type	8,70	4,40	5,91	4,22	3,02	12,57	3,58	5,03
Coefficient de variation (%)	37,6	21,8	16,8	13,7	10,6	37,6	12,5	13,0
Minimum	13,9	13,2	20,8	23,0	22,8	18,0	23,0	31,9
Maximum	51,6	26,5	48,7	37,9	37,6	65,7	39,0	46,7

Tv : Test de virulence

Ls : *Liquidambar styraciflua*

Les résultats de durabilité naturelle trouvés dans cette étude où le bois de Liquidambar de Mandraka est peu ou non durable sont similaires aux résultats rapportés par Johnson (1985) sur du *Liquidambar styraciflua*, et par Chien et *al* (2013) sur du *Liquidambar formosana*. Cette faible durabilité de Liquidambar est principalement due à l'absence des extractibles (taux d'extractibles de Liquidambar de Mandraka 1,1%) pouvant être répulsifs et/ou toxiques pour les organismes lignivores. Toutefois, Chien et *al* (2013), a rapporté que *Liquidambar formosana* renfermait des extractibles non volatils répulsifs des champignons comme l'acide 3 $\alpha$ ,25-dihydroxyolean-12-en-28 oic et du bornyl cinnamate.

### 3-5-Corrélation entre les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar

L'analyse de corrélation montre qu'il existe des corrélations significatives faibles à fortes entre les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar. Ces corrélations sont toutes dans le sens positif sauf pour le cas du module d'élasticité (E) avec le module de cisaillement (G) et celui du point de saturation des fibres (PSF) avec toutes les propriétés physico-mécaniques considérées, excepté le retrait tangentiel (Rt). Dans ce sens, une amélioration sylvicole ou génétique visant à augmenter la valeur d'une propriété physique ou mécanique précise aura pour conséquence d'augmenter la valeur des autres propriétés physico-mécaniques qui sont corrélées à elle.

Cependant, la force de la corrélation entre ses propriétés physico-mécaniques est influencée par la classification suivant les valeurs du diamètre de l'arbre. Les arbres à « croissance lente » (diamètre inférieur ou égal à 30 cm) ont une grande potentialité d'amélioration de son bois, grâce à la forte corrélation entre ses propriétés physico-mécaniques, que les arbres à « croissance rapide » (diamètre supérieur à 40 cm). La

corrélation significative entre la masse volumique ( $\rho$ ) avec le module d'élasticité (E) et le module de rupture en flexion ( $\sigma_F$ ) est de plus en plus forte que la croissance en diamètre des arbres était faible. Pour le cas du E, sa corrélation positive avec la dureté, le retrait tangentiel et l'infradensité devient non significative pour les arbres à « croissance rapide ». Il en est de même pour le cas du module de cisaillement (G) avec la dureté et du module de rupture en flexion ( $\sigma_F$ ) avec le module de rupture en compression axiale (C), l'infradensité, la dureté et le retrait radial. C'était aussi le cas pour la corrélation entre le retrait radial avec le retrait tangentiel et l'infradensité ainsi que la corrélation entre le retrait tangentiel et le point de saturation des fibres (PSF) (Tableau 23).

Tableau 23 : Matrice de corrélation entre les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar

<b>r</b>	<b><math>\rho</math></b>	<b>E</b>	<b>G</b>	<b><math>\sigma_F</math></b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>Rr</b>	<b>Rt</b>	<b>infra</b>	<b>PSF</b>
<b><math>\rho</math></b>		<b>0,51**</b>	<b>0,28*</b>	<b>0,36*</b>	<b>0,29*</b>	<b>0,78**</b>	<b>0,46**</b>	<b>0,43**</b>	<b>0,86**</b>	-0,16(4)
<b>E</b>	(1)0,63** (2)0,57** (3)0,09		<b>-0,22*</b>	<b>0,58**</b>	<b>0,54**</b>	<b>0,27*</b>	<b>0,32*</b>	<b>0,31*</b>	<b>0,51**</b>	<b>-0,31*(4)</b>
<b>G</b>	(1)0,38* (2)0,21* (3)0,40	-0,19 -0,24* -0,25		-0,03	-0,02	<b>0,32*</b>	0,16	0,05	0,18	0,08(4)
<b><math>\sigma_F</math></b>	(1)0,61** (2)0,41* (3)0,09	<b>0,80**</b> <b>0,52**</b> <b>0,63**</b>	0,10 -0,02 -0,14		<b>0,44*</b>	<b>0,44**</b>	0,19	0,16	<b>0,42*</b>	<b>-0,25*(4)</b>
<b>C</b>	(1)0,41** (2)0,32* (3)0,22	<b>0,68**</b> <b>0,53**</b> <b>0,53**</b>	0,02 -0,11 0,16	<b>0,76**</b> <b>0,35*</b> <b>0,37*</b>		<b>0,34*</b>	0,17	0,08	<b>0,27*</b>	<b>-0,43*(4)</b>
<b>N</b>	(1)0,82** (2)0,77** (3)0,78**	<b>0,44*</b> <b>0,32*</b> -0,09	<b>0,45**</b> <b>0,28*</b> 0,25*	<b>0,66**</b> <b>0,44**</b> 0,27	<b>0,29*</b> <b>0,38*</b> 0,10		<b>0,38*</b>	<b>0,31*</b>	<b>0,71**</b>	-0,12(4)
<b>Rr</b>	(1)0,61** (2)0,41* (3)0,46**	<b>0,47**</b> <b>0,36*</b> 0,03	0,30 0,09 0,17	<b>0,39*</b> <b>0,24*</b> -0,04	0,03 <b>0,27*</b> -0,07	<b>0,42*</b> <b>0,39*</b> 0,23		<b>0,24*</b>	<b>0,43*</b>	0,22(4)
<b>Rt</b>	(1)0,58** (2)0,49** (3)0,44**	<b>0,36*</b> <b>0,37*</b> 0,04	0,16 0,02 -0,02	0,27 <b>0,22*</b> -0,06	0,01 0,04 0,21	0,29 <b>0,35*</b> <b>0,39*</b>	<b>0,51**</b> <b>0,24*</b> -0,16		<b>0,46**</b>	<b>0,43***(4)</b>
<b>infra</b>	(1)0,84** (2)0,84** (3)0,76**	<b>0,72**</b> <b>0,54**</b> 0,02	0,16 0,18 0,22	<b>0,69**</b> <b>0,43*</b> 0,25	<b>0,27*</b> <b>0,27*</b> 0,20	<b>0,74**</b> <b>0,67**</b> <b>0,81**</b>	<b>0,61**</b> <b>0,45**</b> 0,22	<b>0,49**</b> <b>0,54**</b> <b>0,61**</b>		<b>-0,25*(4)</b>
<b>PSF</b>	(1)-0,05 (2)-0,14 (3)0,13	<b>-0,33*</b> <b>-0,23*</b> <b>-0,47*</b>	0,15 0,00 -0,06	<b>-0,34*</b> -0,16 <b>-0,52**</b>	<b>0,27*</b> <b>-0,47*</b> <b>-0,61**</b>	-0,18 -0,12 0,03	0,23 0,13 <b>0,41*</b>	<b>0,57**</b> <b>0,42**</b> 0,24	-0,25 -0,18 0,01	

E : module d'élasticité

G : module de cisaillement

$\sigma_F$  : Module de rupture en flexion 4 points

C : Module de rupture en compression axiale

N : dureté Monnin

Rr : retrait radial

Rt : retrait tangentiel

Infra : infradensité

PSF : point de saturation des fibres

\*corrélation significative au seuil de 5%

\*\* : corrélation significative au seuil de 1%

- (1) : coefficient de corrélation pour éprouvettes provenant des arbres dont le diamètre est inférieur ou égal à 30 cm

- (2) : coefficient de corrélation pour les éprouvettes provenant des arbres dont le diamètre est compris entre 30 et 40 cm inclus

- 3) : coefficient de corrélation pour les éprouvettes provenant des arbres dont le diamètre est supérieur à 40 cm

- (4) : coefficient de corrélation sans distinction de diamètre

..... : corrélations différentes suivant les classes de croissance en diamètre

Les moyennes de la masse volumique, de l'infradensité et de module de cisaillement des arbres à croissance rapide (diamètre supérieur à 40cm) sont supérieures aux deux autres classes de croissance en diamètre. Le retrait tangentiel par contre, se trouve diminué. Les travaux de Bouffier et *al* (2008) et Weber & Montes (2010) ont confirmé une augmentation significative de la densité du pin maritime et du dattier du désert (*Balanites aegyptiaca*) respectivement, sur des arbres à croissance rapide. Les travaux de Alfas et *al* (2005), ont confirmé aussi la diminution du retrait pour les arbres à croissance rapide en mettant en évidence une corrélation négative entre la croissance et le retrait du bois. Les autres propriétés mécaniques du bois de Liquidambar sont statistiquement non influencées par la croissance en diamètre. Cependant, leurs valeurs moyennes suivant les classes de diamètre sont différentes. Cette différence due à l'impact indirect de la variation de la masse volumique sur ces propriétés. En effet, les travaux de Zhang, (1995) ont rapporté que « E » est moins sensible à la croissance en diamètre que «  $\sigma_F$  » et « C ». Premièrement, vu l'effet significatif de la croissance en diamètre sur la masse volumique, certaines propriétés mécaniques ou physiques liées à la masse volumique se trouvent modifiées aussi. Deuxièmement, les travaux de Zhang (1995) et Lauridsen & Kjaer (2002) ont confirmé que la corrélation entre le taux de croissance et les propriétés physico-mécaniques était très faible pour les espèces à pores diffus à cause de l'uniformité de la croissance tout au long de l'année. Enfin, l'étude de Zhang et *al* (2007) a rapporté que la corrélation entre certaines propriétés physico-mécaniques du bois est quelque fois dictée par l'effet génotype et de l'environnement, surtout dans un environnement favorable à la croissance de l'arbre comme le cas du Liquidambar à Mandraka. La même étude a rapporté que la force de la corrélation entre ses propriétés a connu une baisse considérable pour les espèces à croissance rapide ; ce qui est effectivement le cas des Liquidambar dans la classe de diamètre à croissance rapide où certaines corrélations n'existent plus pour les individus dont le diamètre est supérieur à 40 cm. Ainsi, nous suggérons que si l'amélioration génétique vise plusieurs caractères en même temps, il serait préférable de travailler sur des individus dont la croissance n'est pas trop élevée. En revanche, pour un caractère (propriété physico-mécanique) donné, il serait plus avantageux de travailler avec des individus à forte croissance en diamètre.

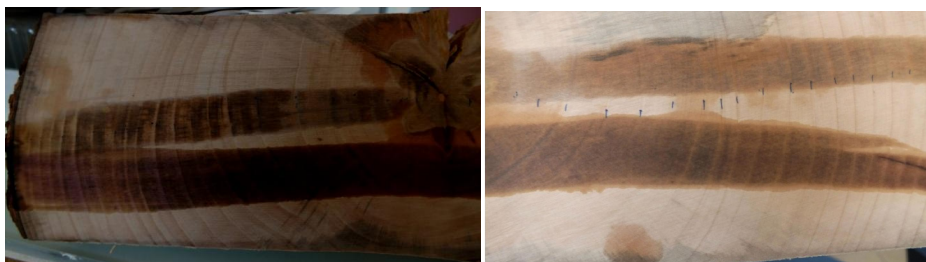
### **3-6-Variabilité intra-arbre des propriétés physico-mécaniques et de durabilité naturelle du bois de Liquidambar**

Les valeurs de la masse volumique, du module d'élasticité, du module de rupture en flexion et en compression, de la dureté Monnin, de l'infradensité, du point de saturation des fibres et des pertes de masses par le champignon *Coriolus versicolor* sur du bois Liquidambar de Mandraka délavé ne sont pas constantes de la moelle à l'écorce. Un accroissement non linéaire, de forme logarithmique, de la masse volumique (Figure 17), du module d'élasticité (Figure 18), du module de rupture en flexion (Figure 19) et en compression (Figure 20), en fonction de l'âge cambial a été observé. La dureté et l'infradensité suivent par contre un accroissement linéaire en fonction de l'âge cambial (Figure 21 et Figure 22). Le point de saturation des fibres diminue de façon non linéaire, de forme logarithmique, suivant l'âge cambial (Figure 23). Enfin, les pertes de masses occasionnées par le champignon *Coriolus versicolor* sur les bois délavés de Liquidambar suivent une diminution linéaire suivant l'âge cambial (Figure 24).

Le réactif chloro-iodure de zinc a révélé deux couleurs différentes sur le disque de Liquidambar : le bois de tension a été coloré en mauve (Photographie 16 A) et le bois normal plutôt en jaune (Photographie 16 B). Le bois de tension est donc bien présent sur la partie inférieure des arbres de Liquidambar de Mandraka. La présence du bois de tension est beaucoup plus marqué pendant les 15 premières années de l'arbre. Pendant cette période, la variation radiale des propriétés du bois de tension est plus importante que celle du bois normal. Après la 10<sup>ème</sup> année de l'arbre, les variations sont similaires.



Photographie 15 : Disque de Liquidambar avant coloration



A : Partie coloré en mauve

B : partie colorée an jaune

Photographie 16 : Disque de Liquidambar après coloration par chloro-iodure de zinc

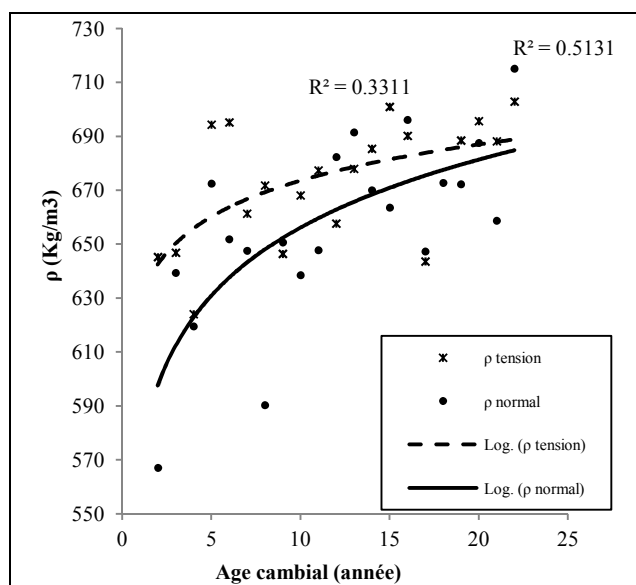


Figure 17 : Variation radiale de la masse volumique du bois de Liquidambar

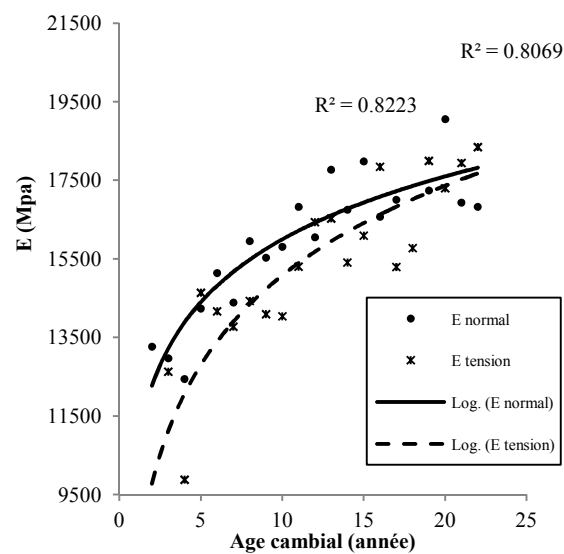
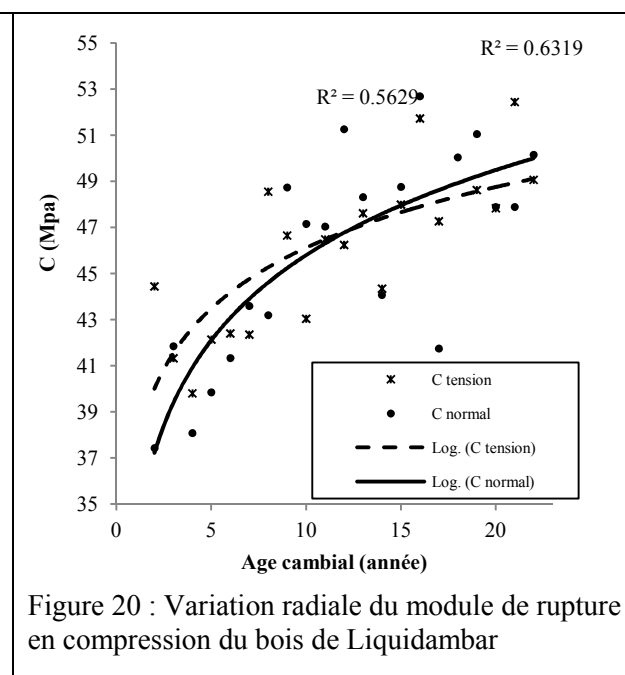
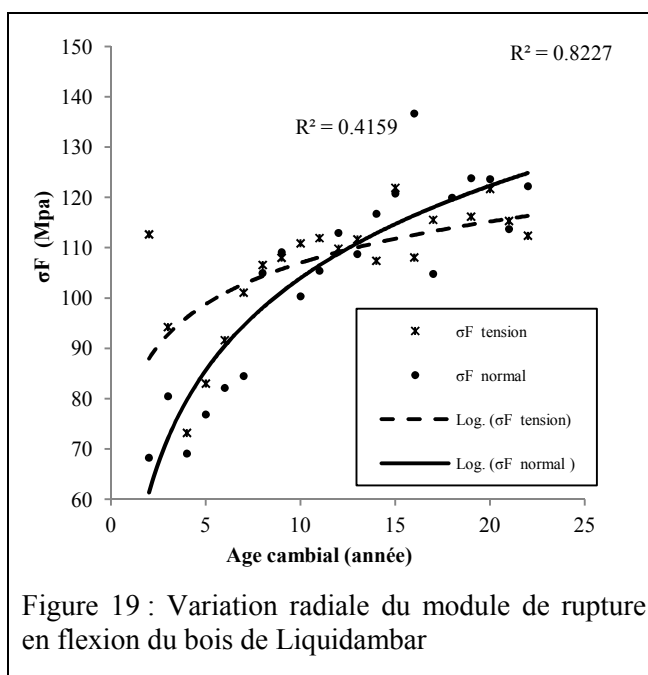


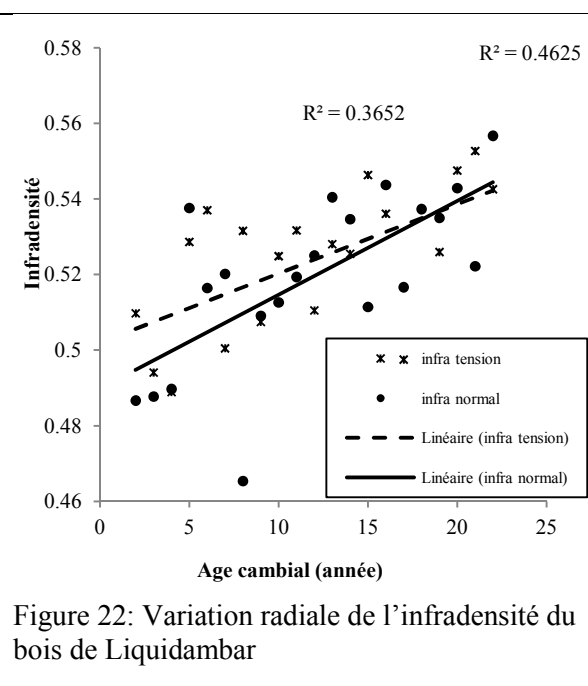
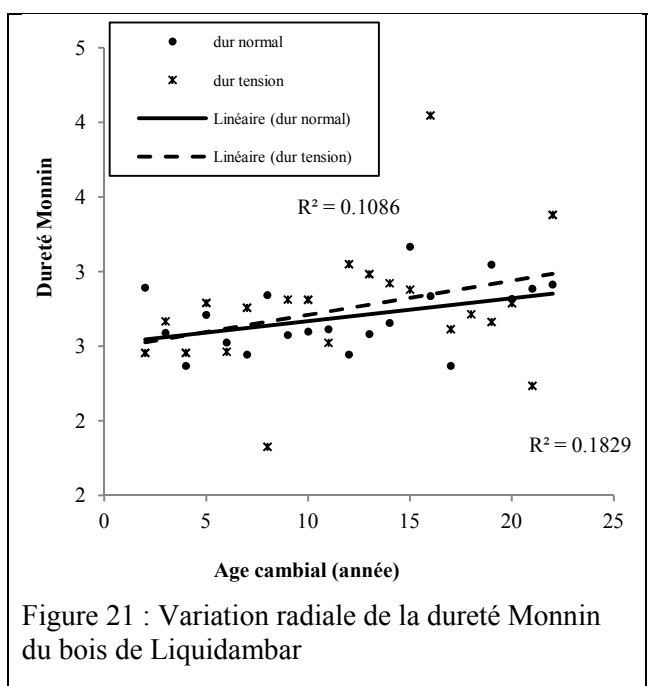
Figure 18 : Variation radiale du Module d'Elasticité du bois de Liquidambar

$\rho$  : Masse volumique ;  $E$  : Module d'élasticité longitudinal

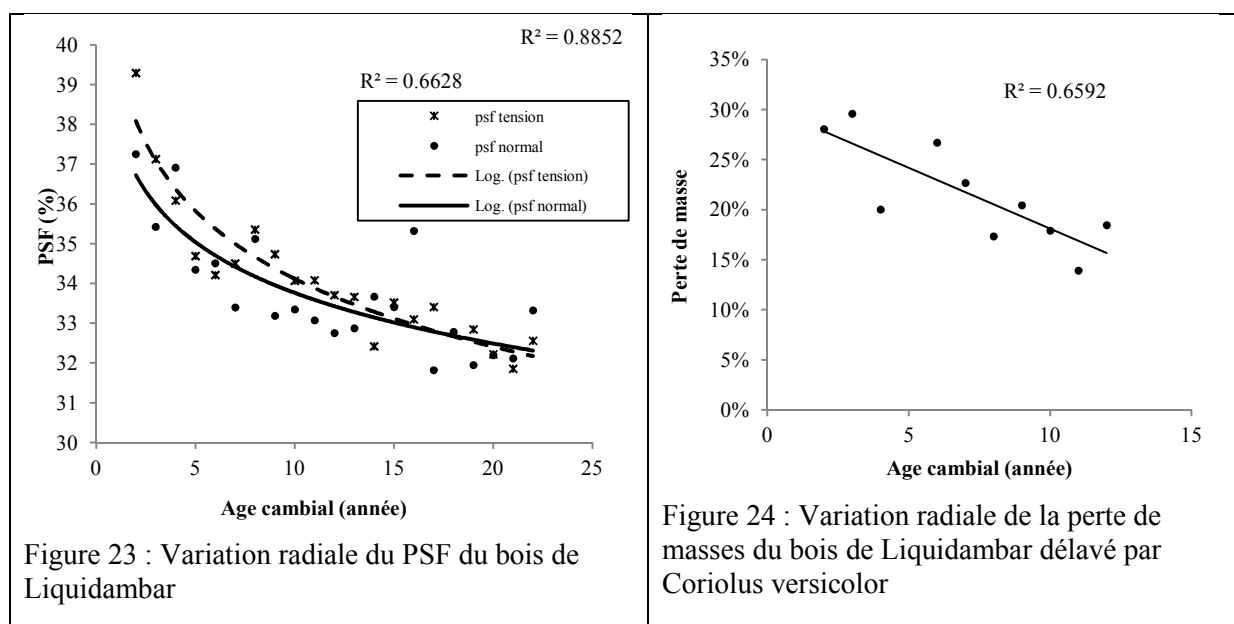




$\sigma F$  : Module de Rupture en flexion 4 points ; C : module de rupture en compression axiale



Dur : dureté Monnin ; Infra : Infradensité



PSF : Point de Saturation des Fibres ; Infra : Infradensité ; Dur : Dureté Monnin ; Cv : *Coriolus versicolor*

La variation non linéaire, de la masse volumique, du point de saturation des fibres, du module d'élasticité, du module de rupture en flexion et en compression du bois de Liquidambar est conforme aux résultats observés par Webb (1964) ; Shupe et al (1995) et Baillères et al (2005). De plus, la variation radiale, de forme logarithmique de ces propriétés ont été retrouvé dans les travaux de Kokutse et al (2004) sur du bois de teck.

Outre la variation radiale de la plupart des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar, cette étude a démontré la présence du bois de tension et du bois normal dans une même grume. Cette présence de bois de réaction est surtout très marquée pendant la période juvénile de l'arbre. Dans notre étude, cette phase juvénile s'est estompée aux alentours de la 10<sup>ème</sup> année de l'arbre. La phase juvénile de l'arbre est différente suivant les espèces et les groupes. Via et al (2003) l'ont défini jusqu'à la 8<sup>ème</sup> année pour *Pinus palustris*. Zobel et al (1959) et Bendtsen (1978) l'ont défini sur des conifères autour de la 20<sup>ème</sup> année de l'arbre, ce qui n'est pas très loin du cas de Liquidambar.

La présence très remarqué du bois de réaction pendant la phase juvénile de l'arbre est surtout liée à l'effet combiné du vent, du terrain en pente et de la cime de l'arbre. En effet, ces trois facteurs ont déplacé le centre de gravité de l'arbre en entraînant son inclinaison. De ce fait, son bois a développé du bois de tension pour remettre l'arbre au vertical. Les travaux de Maeglin (1987) ; Jourez (1997) ; Ruelle (2006) ont rapporté que la plupart des bois inclinés contiennent du bois de tension. En plus de ces trois facteurs, Jourez (1997) a annoncé dans son étude sur le frêne que la croissance rapide peut entraîner aussi la présence de bois de tension. Toutes ces

conditions sont réunies à Mandraka pour que le bois de Liquidambar contienne du bois de tension.

Le bois de tension de Liquidambar est plus lourd, résiste mieux à la compression et son module d'élasticité est plus faible que le bois normal. Ces résultats sont conformes à ceux rapportés par Kollmann & Côté, (1984), qui confirment encore la présence du bois de tension chez le bois de Liquidambar. En plus de la masse volumique, du module d'élasticité et du module de rupture en compression, la présence du bois de tension chez le bois de Liquidambar a modifié aussi la tendance de variation radiale du module de rupture en flexion, de la dureté, de l'infradensité et du point de saturation des fibres de son bois. Ce résultat est vérifié par la valeur plus faible du coefficient de détermination des modèles de variations radiales du bois de tension par rapport à ceux du bois normal. Dans l'utilisation future du bois de Liquidambar de Mandraka, nous conseillons de prendre en compte la présence de ces bois de tension lors de l'abattage et du sciage de son bois comme le suggérait Campredon (1953) ; Sacré (1959) ; Wicker (1979) ; Kollman & Côté (1984).

## CONCLUSIONS

Ce travail est basé sur des essais physiques, mécaniques et de durabilité naturelle en laboratoire. Les échantillons ont été prélevés à environ 1,20 m de la base du tronc de *Liquidambar styraciflua* planté à Mandraka. Pour mieux exploiter son bois, la variation radiale de ses propriétés physico-mécaniques et de durabilité naturelle ainsi que la présence de bois de tension et de bois normal ont été considérées lors de la collecte et du traitement des données. Pour une amélioration future de ses propriétés, des études de corrélations ont été réalisées afin d'identifier les liens entre ces propriétés physico-mécaniques. Des statistiques descriptives et des régressions ont été réalisées. Les résultats de ce travail ont permis de mettre en évidence que le bois de Liquidambar a des propriétés physico-mécaniques moyennes exceptés les retraits et le module d'élasticité ( $\sigma$  : 660Kg/m<sup>3</sup>, E : 15 000Mpa, G : 950 Mpa,  $\sigma_F$  : 100Mpa, C : 45Mpa, N : 2,7, infradensité : 0,52, PSF : 34% , Rr : 5,5%, Rt : 12,4%). Son bois est non durable que ce soit vis-à-vis des termites que des champignons *Coriolus versicolor* et *Coniophora puteanea*. Cependant, les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar à Mandraka, âgé de 23 et 24 ans, sont moins variables et supérieures ou du même ordre de grandeur que celles rapportées par les différents auteurs sur la même espèce dans d'autres pays. Les études de corrélations entre les propriétés physico-mécaniques ont révélé que les corrélations significatives entre les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar sont faibles à fortes. La force de la corrélation entre ses propriétés physico-mécaniques est influencée par la classification suivant

les valeurs du diamètre de l'arbre. En effet, la corrélation entre les propriétés physico-mécaniques est de moins en moins forte pour les arbres dont les diamètres sont classés dans la catégorie des arbres à croissance rapide, avec un diamètre supérieur à 40cm.

Ainsi, nous suggérons que si l'amélioration génétique vise plusieurs caractères en même temps, il serait préférable de travailler sur des individus à croissance en diamètre relativement lente (pour le cas de Liquidambar de diamètre inférieur à 40 cm à 23 ou à 24 ans). Enfin, les valeurs de la masse volumique, du module d'élasticité, du module de rupture en flexion et en compression, de la dureté Monnin, de l'infradensité, du point de saturation des fibres et des pertes de masses par le champignon *Coriolus versicolor* sur du bois délavé ne sont pas réparties uniformément à l'intérieur du bois de Liquidambar de Mandraka. Ainsi, dans l'utilisation future de son bois, nous conseillons de prendre en compte la présence de ces variations radiales ainsi que celui du bois de tension lors de l'abattage et du sciage.

A partir des arbres d'éclaircie, généralement dominés, de mauvaises conformations, cette étude a démontré que la région de Mandraka constitue une zone où les propriétés du bois de Liquidambar sont meilleures que pour les Liquidambars dans son aire d'origine Johnson (1985) et à Colombo (Mattos et al, 2001). Cependant, et vu que les propriétés physico-mécaniques du bois dépend en partie de la vitesse de sa croissance, il serait judicieux d'étudier également les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar sur des arbres dominants que nous allons aborder dans les chapitres suivants.

## CHAPITRE IV : CARACTERISATION DES PROPRIETES PHYSICO MECANQUES DU BOIS DE *LIQUIDAMBAR STYRACIFLUA* DE MANDRAKA PAR METHODES NON DESTRUCTIVES

### I- INTRODUCTION

La caractérisation des propriétés du bois, utilisant des méthodes normalisées, est couteuse en temps et demande une quantité importante de matériel végétal. De plus, ces méthodes sont généralement destructives que ce soit pour l'échantillon à tester ou pour les arbres. En effet, l'extraction des échantillons nécessite généralement l'abattage des arbres. Ainsi, avec ces méthodes standards, il n'est pas possible de suivre l'évolution des propriétés de l'arbre durant sa croissance. L'objectif principal de ce travail est de connaître les propriétés du bois de Liquidambar sans avoir recours à l'abattage. La meilleure technique semble alors de travailler sur des échantillons de faible dimension, comme les carottes. Les travaux de Perrin & Ferrand (1984) ; Bucur (1986), Nepveu (1988), Pelletier et al (2008) ont montré qu'il est possible d'estimer les retraits (tangentiels, radiaux), les contraintes de croissance et le module d'élasticité (EL) à partir des carottes, extraites sur des arbres sur pieds. De plus, les résultats obtenus sont aussi fiables qu'avec les méthodes conventionnelles utilisant des éprouvettes normalisées. Pour ce qui est du module d'élasticité longitudinal, les travaux de Bucur (1981) utilisant le module dynamique apparent qui est mesuré par un dispositif ultrasonore, a utilisé l'équation (Equation 21) suivante.

Equation 21) 
$$V^2 = \frac{E_{\text{Dynamique}}}{\rho}$$

Avec  $E_{\text{Dynamique}}$  : module dynamique apparent,  $V$  : vitesse de propagation d'une onde de compression dans le matériau et  $\rho$  : masse volumique du matériau.

Bucur (1981) a utilisé des carottes de 0,5 cm de diamètre. L'estimation du temps de propagation (temps de vol) dans ses travaux n'est pas précise si on applique sur de petites éprouvettes. De plus, l'auteur a utilisé des capteurs d'une fréquence de 80 kHz non adaptés pour ce type d'échantillon. Les récents travaux de Sandoz et al (2000) ; Sandoz & Benoit (2006) ; Brancheriau (2013) dans le domaine du bois avec les ultrasons ont essayé d'améliorer l'estimation du module d'élasticité sans toutefois le comparer avec des essais standards. Dans ce sens, l'équipe du CIRAD xylométrie a développé un dispositif ultrasonore (UScan) permettant d'estimer le temps de vols par différentes méthodes (seuillage automatique par analyse du bruit, seuillage par analyse de variance au sens de Fisher, inter-corrélation). Un des objectifs de ce chapitre est donc de (i) comparer le module d'élasticité longitudinal estimé par

le dispositif ultrasonore UScan et le module obtenu par méthode standard (analyse modale des vibrations de flexion dans le domaine acoustique) en travaillant avec des échantillons de *Liquidambar styraciflua* L.

Dans le but de connaître les propriétés du bois, indispensables à sa future utilisation et à son amélioration, l'utilisation de la prédiction par Spectrométrie Proche Infra Rouge (SPIR) est une approche adaptée. Les travaux de Birket & Gambino (1998) ; Schimleck et *al* (2002) ; Baillères et *al* (2002) ; Schimleck & Evans (2004); Hein et *al* (2010) et Chaix et *al* (2010) ont montré que certaines propriétés physico-mécaniques du bois peuvent être prédites par spectrométrie. Dans cette optique, ce travail se propose également **(ii)** d'identifier des modèles de prédiction des propriétés physico mécaniques du bois de *Liquidambar styraciflua* L. de l'essai de provenance de Mandraka.

Dans cette étude, il existe deux méthodes différentes d'estimation du module d'élasticité (estimation par ultrason et prédiction par SPIR) sur les mêmes carottes de bois de Liquidambar. Ainsi, nous nous proposons **(iii)** de comparer les propriétés prédites par SPIR et estimées par UScan sur des carottes de bois de Liquidambar avec les propriétés mesurées par la méthode standard sur des échantillons normalisés.

## **II- MATERIELS ET METHODES**

### **2-1-Matériels d'étude**

Deux cent quatre vingt dix sept (297) éprouvettes de *Liquidambar styraciflua*, découpées tangentiellement aux cernes d'accroissement sur 54 plateaux diamétraux ont été utilisées dans cette étude pour effectuer la calibration par SPIR. Les plateaux proviennent des arbres d'éclaircies de l'essai de provenance de *Liquidambar styraciflua* à Mandraka. Trente trois (33) autres éprouvettes de Liquidambar (30 mm x 20 mm x 20 mm LRT), provenant du même site d'essai, découpées de la même façon que précédemment, ont été utilisées pour établir et vérifier la fiabilité de la valeur du module d'élasticité longitudinal obtenue par la méthode standard et celle du dispositif ultrasonore. Ces 33 éprouvettes ont été ensuite utilisées pour vérifier la possibilité de travailler avec de petits échantillons. Enfin, 99 carottes diamétrales provenant des arbres dominants et/ou co-dominants ont été échantillonnées. Ces carottes ont été utilisées pour vérifier la fiabilité de la méthode prédictive SPIR et la méthode d'estimation par ultrason (UScan) vis-à-vis des méthodes de caractérisation normalisées. Dans cette étude, des arbres ont été abattus même si l'objectif est de pouvoir estimer et/ou prédire les propriétés du bois sans avoir recours à l'abattage. Cet abattage est nécessaire pour

l'étalonnage des méthodes non destructives employées et pour démontrer également l'efficacité de ces méthodes.

## 2-2-Paramètres mesurés

La masse volumique ( $\rho$ ), le module de rupture en compression axiale ( $C$ ), le module de rupture en flexion longitudinal ( $\sigma_F$ ), la dureté Monnin ( $N$ ), le retrait radial ( $R_r$ ) et tangentiel ( $R_t$ ), l'infradensité (Infra), le point de saturation des fibres (PSF) ont été mesurés suivant des normes françaises à partir des 297 éprouvettes. Le module d'élasticité longitudinal (EL) a été estimé à partir de l'analyse vibratoire BING® (Beam Identification for Nondestructive Grading) version 2009, développé par le CIRAD. Dans la suite de cette étude, nous assimilons cette méthode de mesure de module d'élasticité comme méthode standard. En effet, les travaux de Brancheriau & Baillères (2002) et de Brancheriau et *al* (2002) ont montré que le EL obtenu par analyse vibratoire avec l'outil BING® est statistiquement le même que le EL mesuré par flexion 4 points suivant la norme NF EN 408+A1.

## 2-3-Démarche de vérification du module obtenu par ultrason

Le module longitudinal (EL) des 33 éprouvettes de dimension 30 mm x 20 mm x 20 mm a tout d'abord été mesuré par analyse vibratoire BING (EL-Bing) puis par le dispositif ultrasonore UScan (EL-360). Un petit échantillon (dimension 10 mm x 20 mm x 20 mm) a ensuite été découpé au milieu de chaque éprouvette. Le module d'élasticité (EL-10) de ces petits échantillons a été mesuré par UScan. Trois répétitions de mesure, comme le faisait Bucur (1981) dans ses travaux, ont été effectuées sur chaque échantillon lors de l'utilisation du dispositif ultrasonore. Le module utilisé sera ensuite la moyenne de ces trois mesures (Figure 25).

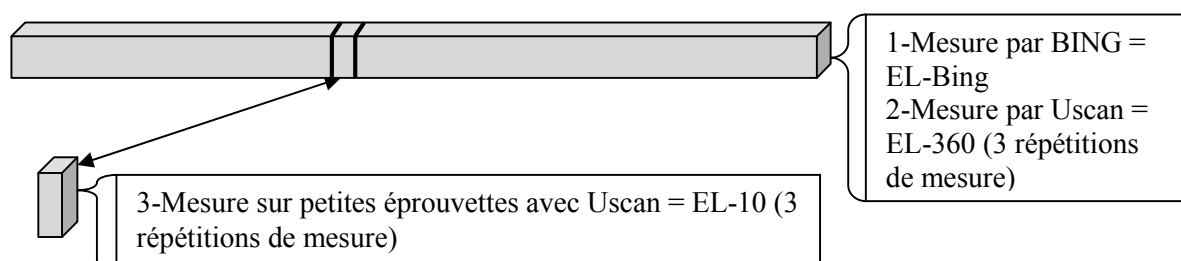


Figure 25: Résumé de la démarche de la vérification du EL obtenu par ultrason en comparaison avec EL obtenu par méthode normalisée

## 2-4-Mesures ultrasonores



Photographie 17 : Dispositif ultrasonore (UScan)

Pour les mesures avec UScan (Photographie 17), les paramètres suivants ont été définis :

(1) La durée d'acquisition du signal (Equation 22) qui renseigne sur le temps total d'une mesure.

Equation 22) 
$$\text{Durée d'acquisition } (\mu s) = \frac{\text{Nombre de points}}{\text{Fréquence d'échantillonnage}}$$

(2) L'erreur due à l'échantillonnage (Equation 23) indique l'erreur de la position des points sur un intervalle de temps. Plus l'erreur est faible, meilleure est la détermination du temps de vol.

Equation 23) 
$$\text{Erreur due à l'échantillonnage } (\mu s) = \frac{1}{\text{Fréquence d'échantillonnage}}$$

(3) L'erreur de détermination du temps de vol (Equation 24), exprimée en pourcentage est définie comme suit :

Equation 24) 
$$\text{Erreur de détermination du temps de vol } (\%) = \frac{\text{Erreur due à l'échantillonnage}}{\text{Temps de vol moyen}} \times 100$$

Afin de déterminer expérimentalement l'incertitude de mesure du module avec le dispositif ultrasonore et BING®, 30 répétitions de mesure ont été effectuées sur une même



éprouvette en recalculant à chaque fois la masse volumique de l'échantillon. L'incertitude de mesure est calculée suivant l'équation (Equation 25) selon Defix (1985).

$$\text{Equation 25)} \quad \text{Incertainitude (\%)} = \frac{1,96 \times \text{Ecart-type}}{\text{Moyenne}} \times 100$$

## 2-5-Correction de la vitesse de propagation par considération de l'effet poisson

« L'effet Poisson » est la contraction latérale d'une poutre lorsqu'elle est étirée par une force colinéaire à l'axe de son plus grand longueur (Rayleigh & Lindsay, 1877 ; Love, 1892). Pour une poutre très élancée ou pour les éléments se situant au voisinage de la fibre neutre, il est possible de négliger l'effet Poisson (Rayleigh & Lindsay, 1877). A cet effet, Rayleigh & Lindsay (1877) a corrigé l'expression des fréquences de vibrations longitudinales en prenant en compte l'effet Poisson en supposant la poutre comme isotrope. Ensuite, pour le cas d'une poutre orthotrope (Figure 26), Brancheriau (2011) a corrigé la vitesse de propagation de l'onde dans le matériau, suivant une approche énergétique, tout en considérant l'effet Poisson (Equation 26). La correction de Brancheriau (2011) a été utilisée, dans la suite de notre étude, car elle intègre mieux les caractéristiques du bois par rapport aux matériaux isotropes.

Equation 26)

$$V^2 = \frac{E_X}{\rho} \frac{1}{1 + \frac{(n\pi)^2}{SL^2} (I_{GZ} \nu_{XY}^2 + I_{GY} \nu_{XZ}^2)} \frac{(1 - \nu_{YZ} \nu_{ZY})}{1 - (\nu_{YZ} \nu_{ZY} + \nu_{XZ} \nu_{ZX} + \nu_{XY} \nu_{YX} + \nu_{XZ} \nu_{YX} \nu_{ZY} + \nu_{XY} \nu_{YZ} \nu_{ZX})}$$

Avec  $n \in \mathbb{N}^*$ ,  $E_X$  : module d'élasticité dans le sens X,  $S$  : section de la barre,  $L$  : longueur de la barre,  $I_{GZ}$  et  $I_{GY}$  : moments quadratiques tels que  $I_{GZ} = bh^3/12$  et  $I_{GY} = hb^3/12$ ,  $h$  : hauteur de l'éprouvette,  $b$  : épaisseur de l'éprouvette,  $\nu_{XY}$  : coefficient de poisson en XY, et  $\nu_{XZ}$  : coefficient de poisson en XZ.

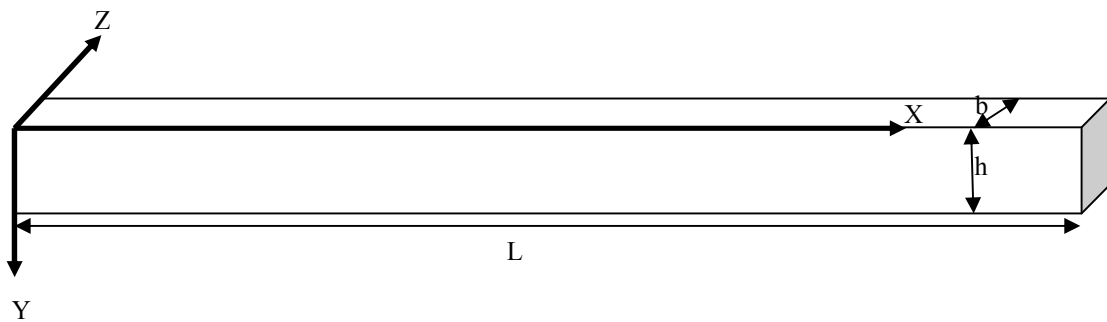


Figure 26: schéma d'une poutre orthotrope

L'équation (Equation 26) a été utilisée pour simuler les valeurs du module d'élasticité estimé par ultrason sur les baguettes de 360x20x20 mm et sur les échantillons de 10x20x20 mm en prenant le module d'élasticité estimé par BING comme module d'élasticité longitudinal. Ces simulations ont ensuite été comparées aux résultats de mesures directes effectuées sur les échantillons de Liquidambar.

## **2-6-Acquisition des spectres d'absorption proche infra rouge**

La masse volumique ( $\rho$ ), le module d'élasticité (EL), le module de rupture en flexion longitudinale ( $\sigma_F$ ), le module de rupture compression axiale (C), la dureté Monnin (N), le retrait radial (Rr) et tangentiel (Rt), l'infradensité (Infra) et le Point de Saturation des Fibres (PSF) ont été les paramètres physico-mécaniques du bois considérés dans cette étude. Ces propriétés ont été déterminées suivant les protocoles de mesure standardisées (paragraphe 2-3 Chapitre III, Tableau 18). Avant tous les essais physiques, des spectres d'absorption proche infrarouge ont été relevés sur les échantillons normalisés de Liquidambar. Le spectrophotomètre Bruker (model Vector 22/N), associé au logiciel OPUS version 4.2 a été utilisé sous mode de réflectance diffuse avec une référence en or fritté. Le même matériel, avec le même logiciel de pilotage, a été ensuite utilisé avec les mêmes réglages pour mesurer les spectres d'absorption des carottes à prédire.

Ce spectrophotomètre, qui est à transformée de Fourier, est destiné pour l'analyse de la réflectance des solides avec une sphère d'intégration mesurant la lumière diffuse sur une surface de 150 mm<sup>2</sup>. La sphère d'intégration peut recueillir toute la lumière diffuse sur tous les angles. Les effets de la texture du bois, due à l'irrégularité de l'état de surface et à l'usinage, sont ainsi minimisés. L'acquisition des spectres a été réalisée sur la gamme de 12500 à 3500 cm<sup>-1</sup> (800 à 2850 nm) avec une résolution de 8cm<sup>-1</sup>. Chaque spectre est composé de 2335 valeurs d'absorption. Pour chaque échantillon, chaque spectre résulte de la moyenne de 16 scans afin d'améliorer le ratio signal sur bruit.

Les spectres SPIR ont été prélevés sur la face transversale (plan tangentiel radial) de chaque éprouvette. En effet, les travaux de Chaix et *al* (2010) ont démontré que les modèles de calibration SPIR sont meilleurs avec l'information spectrale de ce plan.

## 2-7-Calibration du modèle de prédiction par spectroscopie

Afin de déceler les spectres atypiques (outliers), une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée avec le logiciel Unscrambler (version 9.7). L'ACP permet de déceler les échantillons non homogènes par rapport au groupe d'échantillons (Smith, 2002 ; Bertrand, 2005). Ces outliers ont été ensuite enlevés lors de la réalisation du modèle de prédiction. Les modèles de prédiction par SPIR ont été obtenus par la méthode de régression PLS (Partial Least Square) en utilisant le logiciel Unscrambler (version 9.7). Le choix de régression PLS a été motivé par sa capacité à compresser les informations spectrales sans perdre les informations qu'ils véhiculent (Jouan-Rimbaud et *al*, 1999 ; Naes et *al*, 2004) et d'établir un étalonnage liant les données de références (dans notre cas les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar) aux informations contenues dans les spectres d'absorption proche infra rouge (Wold et *al*, 2001 ; Giordanengo et *al*, 2009).

Avant de réaliser la régression PLS, les spectres ont été transformés par dérivée (premier ou second degré) suivant l'algorithme de Savitzky & Golay (1964) puis par normalisation SNV (Standard Normal Variate). Ces transformations de données ont permis d'améliorer la qualité de l'étalonnage tout en gardant les informations contenues dans le spectre (Naes et *al*, 2004 ; Hein et *al*, 2010). La technique de validation croisée (10 segments aléatoires) a été employée pour établir le modèle de prédiction (étalonnage) par SPIR des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar. Plusieurs critères ont été choisis avant de retenir l'étalonnage approprié à savoir : (a) les valeurs du coefficient de détermination entre valeurs mesurées et valeurs prédites en calibration ( $R^2c$ ), ou en la validation croisée ( $R^2cv$ ); (b) Le RMSEC ou « Root Mean Square Error of Calibration » (écart type des résidus de calibration), de la validation croisée (RMSECV) et (c) le « Ratio Performance Déviation » (RPD) qui est le rapport entre l'écart type  $\sigma$  des échantillons considérés et le RMSECV du modèle (Equation 27).

Equation 27) 
$$RPD = \frac{\sigma}{RMSECV}$$

Les procédures de calculs de RMSEC et RMSECV ont été développés et démontrés dans les travaux de Burns & Ciurczak (2008) (Equation 28 et Equation 29).

Equation 28) 
$$RMSEC = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{N - A - 1}}$$

Equation 29)

$$RMSECV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_{CVi} - y_i)^2}{N}}$$

Où les  $\hat{y}_i, \hat{y}_{CVi}$  sont obtenus en testant l'équation de la calibration directement sur les données relatives aux échantillons de prédiction ou de validation croisée. A est le nombre de variables latentes lors de la réalisation de la validation croisée. N est le nombre d'échantillons. Pour qu'un modèle soit fiable et satisfaisant, les critères RMSEC et RMSECV doivent être voisins et les plus faibles possible, et  $R^2c, R^2cv, RPD$  les plus élevés (Fujimoto et al, 2008).

### III- RESULTATS ET DISCUSSION

#### 3-1-Caractéristiques du dispositif ultrasonore et qualité du signal

Plusieurs essais de paramétrage ont été réalisés pour le dispositif ultrasonore ; les paramètres optimaux sont présentés dans le Tableau 24. Pour ce qui est de l'erreur commise lors de la détermination du temps de vol, celle des petits éprouvettes (10 mm x 20 mm x 20 mm) est 8 fois supérieure à celle des baguettes de 360 mm x 20 mm x 20 mm bien que la fréquence d'échantillonnage ait été 4 fois plus élevée pour les petites éprouvettes par rapport aux baguettes. Cette différence d'erreur est surtout liée à la faible dimension de l'éprouvette. Cependant, la qualité des signaux reçus, que ce soit pour les baguettes que pour les petits échantillons est satisfaisante pour pouvoir estimer le temps de vol (Figure 27). Suivant le paramétrage décrit par le Tableau 24, il est possible de situer à 2,5% près le début du signal reçu pour les éprouvettes de 10 mm x 20 mm x 20 mm et à 0,3% près celui des baguettes de 360 mm x 20 mm x 20 mm. De plus, sur la Figure 27, le départ du signal émis est très net aussi et se situe juste avant l'impulsion.

Tableau 24 : Caractéristiques du dispositif ultrasonore et qualité du signal

Paramètre	UScan pour les éprouvettes 360 mm x 20 mm x 20 mm	UScan pour les éprouvettes 10 mm x 20 mm x 20 mm
Fréquence du transducteur (Khz)	1 000	1 000
Fréquence d'émission (Khz)	1 000	1 000
Nombre d'arches	5	1
Nombre de points	4 096	1 024
Fréquence d'échantillonnage (Khz)	5 000	20 000
Durée d'acquisition ( $\mu$ s)	1 640	50
Erreur due à l'échantillonnage ( $\mu$ s)	$\pm 0,2$	$\pm 0,05$
Erreur de détermination du temps de vol (%)	$\cong 0,3$	$\cong 2,5$
Couplant	Gel	Miel de Madagascar

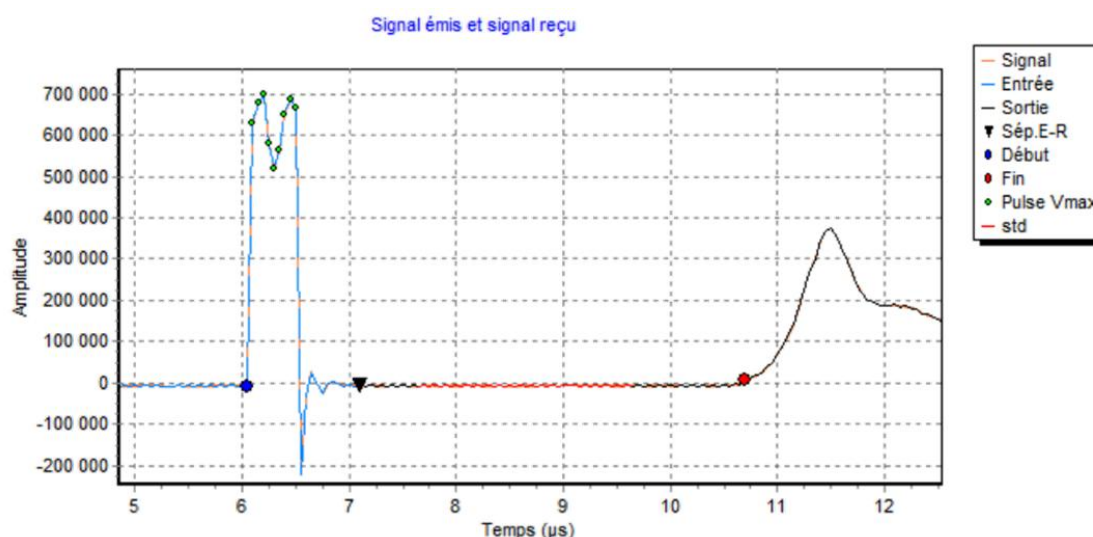


Figure 27 : caractéristique des signaux ultrasonores

### 3-2-Incertitude de mesure

La répétition des mesures a révélé que l'erreur de mesure d'EL-360 et EL-Bing (2%) sont du même ordre et que l'erreur de mesure d'EL-10 est supérieure (11%) (Tableau 25). Cette différence est surtout due à l'erreur liée à l'estimation du temps de vol par UScan sur les deux échantillons de tailles différentes.

Tableau 25 : Incertitude de mesure

Mode de mesure	Moyenne sur 30 répétitions de mesures	Ecart-type	Erreur (%)
EL-Bing (Mpa)	17627	218	2,42
EL-360 (Mpa)	18394	205	2,18
EL-10 (Mpa)	19649	1156	11,5

Les erreurs de mesure observées dans notre étude sont acceptables et même inférieures aux erreurs de mesure avec la méthode standard d'essai statique 3 points ou 4 points, sauf pour le cas des petites éprouvettes. En effet, les travaux de Brancheriau et *al* (2002), ont rapporté que l'erreur de mesure du module d'élasticité par flexion trois points est de 9 % et du 4 points est de 6 % pour les baguettes de dimensions 360 mm x 20 mm x 20 mm.

Les erreurs de mesure réelles par BING® et par UScan sur les baguettes de 360 mm x 20 mm x 20 mm sont 3 fois plus petites que les erreurs théoriques calculées sur la méthode standard par flexion 4 points. Avec les petites éprouvettes de dimension 10 mm x 20 mm x 20 mm, l'erreur de mesure par UScan est du même ordre que l'erreur commise lors de l'estimation du module d'élasticité par flexion 3 points. Ces faibles valeurs de l'erreur de mesure montrent la possibilité d'estimer le module d'élasticité longitudinal avec le dispositif UScan même pour les éprouvettes de petites dimensions (longueur 10 mm).

### 3-3-Comparaison des valeurs du module d'élasticité longitudinal obtenues par ultrason et par BING

Le module d'élasticité longitudinal estimé par BING® (EL-Bing) sur les baguettes de 360 mm x 20 mm x 20 mm est du même ordre de grandeur que celui estimé par le dispositif ultrasonore que ce soit pour les petits échantillons de 10 mm x 20 mm x 20mm (EL-10) que sur les baguettes de 360 mm x 20 mm x 20 mm (EL-360). Cependant, l'analyse de variance a révélé qu'il existe une différence significative au seuil de 1% entre les moyennes du module d'élasticité longitudinal mesuré par les deux méthodes (UScan et BING®) sur la population étudiée. A cet effet, la comparaison deux à deux a révélé que seule la moyenne du module d'élasticité estimé par UScan (El-360) est supérieure aux deux autres modules EL-10 et EL-Bing (Tableau 26 et Figure 31).

Tableau 26 : Comparaison des moyennes des valeurs de Module d'élasticité estimé par BING et par UScan

	Source de variabilité	ddl	p	Modalité	Moyenne	Groupes	Contraste	Différence	p
Avec biais	Modèle	2	< 0,0001	EL-360	18 252,3	A	EL-360 vs EL-Bing	1 622,9	< 0,0001
	Erreur	60		EL-10	16 103,2	B	EL-360 vs EL-10	2 149,1	< 0,0001
	Total corrigé	62		EL-Bing	16 629,4	B	EL-10 vs EL-Bing	526,2	0,214

ddl : degré de liberté

EL-360 : E mesuré par UScan sur les baguettes de 360x20x20 mm

EL-Bing : E mesuré par BING sur les baguettes de 360x20x20 mm

EL-10 : E mesuré par UScan sur les baguettes de 10x20x20 mm

p : probabilité de retour

Des régressions linéaires significatives au seuil de 1% ont été observées entre EL-Bing, EL-10 et EL-360 (Figure 28, Figure 29 et Figure 30) (ANNEXE 7). Le coefficient de détermination de la régression d'EL-Bing/EL-10 ( $R^2=0,72$ ) est inférieur à ceux d'EL-Bing/EL-360 et EL-360/EL-10 ( $R^2=0,80$  et  $R^2=0,82$ ) (ANNEXE 7). Cependant en raison du faible nombre de points expérimentaux (intervalle des  $R^2$ ), la différence des  $R^2$  ne peut être clairement établie. Les valeurs des intervalles de confiance des modèles montrent également que « statistiquement » EL-360=EL-Bing et EL-Bing=EL-10 pour une prédiction des valeurs individuelles. La même remarque que précédemment s'applique cependant (ANNEXE 7).

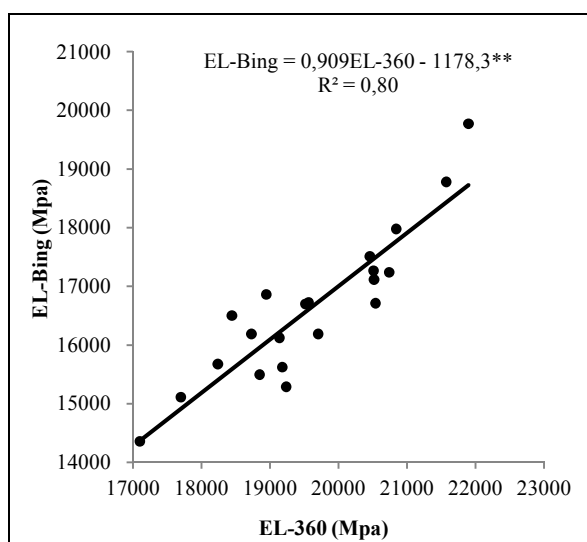


Figure 28 : Régression entre EL-360 et EL-Bing

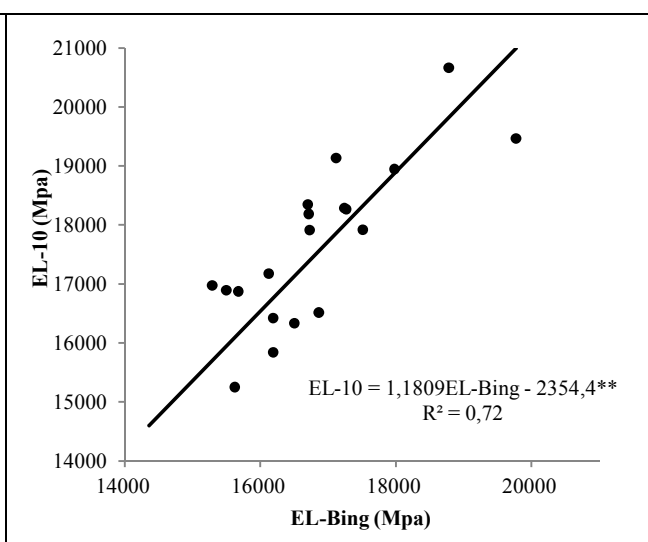
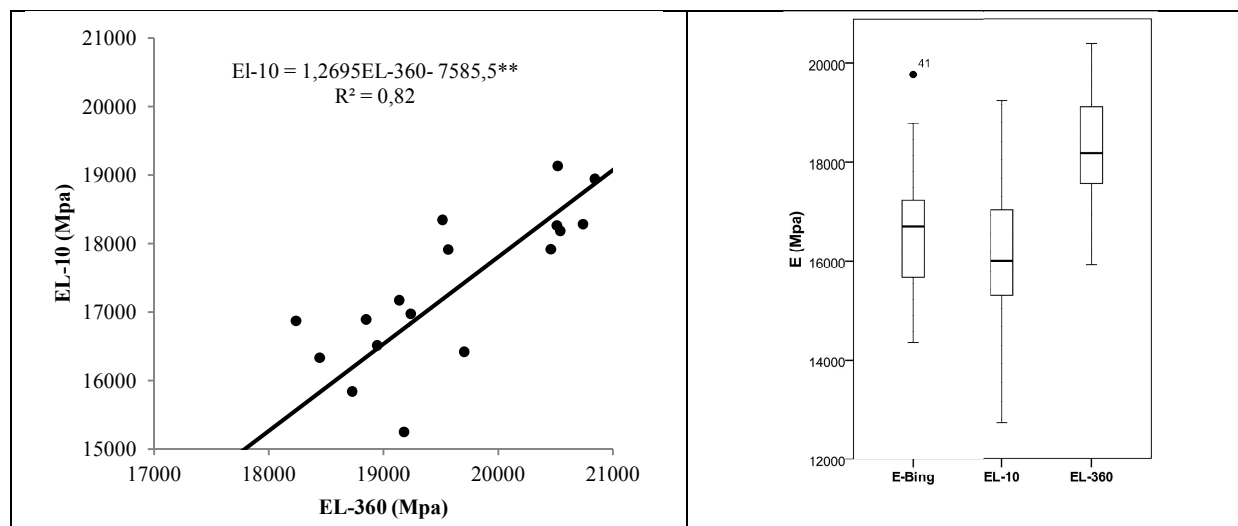


Figure 29 : Régression entre EL-Bing et EL-10



EL-Bing : Module d'élasticité mesuré par BING sur les baguettes de 360 mm x 20 mm x 20 mm  
 EL-10 : Module d'élasticité estimé par UScan sur les éprouvettes de 10 mm x 20 mm x 20 mm

Figure 30 : Régression entre EL-360 et EL-10

EL-360 : Module d'élasticité estimé par UScan sur les éprouvettes de 360 mm x 20 mm x 20 mm  
 \*\* : corrélation significative au seuil de 1%

Figure 31 : Box plot de EL-36, EL-10 et EL-Bing

Le dispositif ultrasonore surestime en moyenne le module d'élasticité longitudinal des baguettes de 360 mm x 20 mm x 20 mm par rapport à la valeur d'EL-Bing de l'ordre de 9 % entraînant un biais systématique de 1 600 MPa. La différence entre le module d'élasticité longitudinal moyen estimé par UScan sur les baguettes de 360 mm x 20 mm x 20 mm (EL-360) et sur les petits échantillons de 10 mm x 20 mm x 20 mm (EL-10) est de 2150 Mpa (différence de 12%). Par contre la différence entre EL-Bing et EL-10 n'est pas significative (différence observée de 3%) (Tableau 27). Ces résultats sont conformes à ceux de Bucur (1981) sur du Hêtre : le EL estimé par ultrason sur des éprouvettes de 360 mm x 20 mm x 20 mm est supérieur à EL estimé par le même dispositif sur des carottes de 5 mm de long. Cependant, le travail de Bucur (1981) montre un écart de valeur plus important que notre travail.



Tableau 27 : Différence de valeur d'estimation du module d'élasticité

Bucur (Hêtre)	EL ultrason (360 mm x 20 mm x 20 mm)	32% >	EL ultrason (5 mm de long)	6,3% >	EL standard (flexion statique) (360 mm x 20 mm x 20 mm)
					36,3%
Liquidambar	EL-360 (360 mm x 20 mm x 20 mm)	8,9% >	EL-Bing (360 mm x 20 mm x 20 mm)	3,2% ≡	EL-10 (10 mm x 20 mm x 20 mm)
					12%
Simulation	EL*-360 (360 mm x 20 mm x 20 mm)	7% >	EL-Bing (360 mm x 20 mm x 20 mm)	19% >	EL*-10 (10 mm x 20 mm x 20 mm)
					26%

EL : module d'élasticité longitudinal mesuré

EL\* : module d'élasticité simulé

En prenant comme valeur exacte du module d'élasticité longitudinal la valeur obtenue par BING®, la simulation des valeurs (Equation 26) a révélé que le module d'élasticité longitudinal estimé par ultrason sur les baguettes de 360 mm x 20 mm x 20 mm (EL\*-360) est supérieur au module d'élasticité estimé par BING® sur les baguettes de 360 mm x 20 mm x 20 mm (EL-Bing) et ce dernier à son tour est supérieur au module d'élasticité estimé par UScan sur les éprouvettes de tailles plus petites (10 mm x 20 mm x 20 mm) (EL\*-10) (Tableau 27).

Les résultats de notre travail montrent un écart pour le passage EL360 - EL10 entre l'expérience et la simulation (12% et 26% respectivement, Tableau 27). Ceci peut s'expliquer par les valeurs des coefficients de Poisson utilisées dans la simulation (valeurs de la littérature du feuillu 'standard', Guitard (1987) ; Equation 26 est également une solution approchée). Ces différences de valeurs justifient la présence de biais systématiques observés dans notre travail mais confirme aussi la possibilité d'estimer le module d'élasticité longitudinal d'une petite éprouvette de Liquidambar long de 10 mm avec le dispositif ultrasonore UScan.

### 3-4-Modèles de prédictions par SPIR des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar

Après avoir exploité les données des spectres obtenus pour les échantillons de Liquidambar, les modèles de prédictions du Point de Saturation des fibres, de l'infradensité et du Module d'élasticité du bois de Liquidambar sont jugés satisfaisant. En effet, ces modèles ont tous un RMSECV et RMSEC proches. Il en est de même pour leur  $R^2_{cv}$  et  $R^2_c$ . De plus, ils ont un RPD supérieur à 2,5, ce qui est suffisant pour prédire une propriété alors que (Schimleck & Evans, 2004). Les modèles SPIR pour le module de rupture en compression et en flexion, pour les retraits radial et tangentiel et pour la dureté, ont un RPD inférieur à 2,5 mais supérieur à 1,5. Ils ont aussi des faibles  $R^2$ . D'après les travaux de Schimleck et al (2003), un modèle à RPD avoisinant 1,5 est satisfaisant pour des prédictions préliminaires. Cependant, tout dépend du ratio entre erreur de prédiction et erreur de mesure ou encore de l'erreur 'acceptable' par l'utilisateur.

Tableau 28 : Modèles de prédiction par SPIR des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar

Propriétés	Traitement	$R^2_c$	RMSEC	$R^2_{cv}$	RMSECV	RPD
PSF (Point de Saturation de Fibres)	Dérivée seconde	0,92	0,55	0,84	0,78	3,23
Infradensité		0,88	0,011	0,83	0,013	2,92
Module d'élasticité (EL)	Dérivée première	0,82	1 033	0,80	1 117	2,58
Module de rupture en compression axiale (C)	Dérivée seconde	0,57	3,24	0,49	3,57	1,75
Module de rupture en flexion longitudinale ( $\sigma_F$ )		0,70	10,97	0,47	14,61	1,62
Dureté MONNIN		0,61	0,34	0,53	0,37	1,84
Retrait radial (Rr)	Dérivée première	0,58	0,31	0,42	0,37	1,56
Retrait tangentiel (Rt)	Dérivée seconde	0,65	0,44	0,49	0,53	1,85

$R^2_c$  : coefficient de détermination en calibration

$R^2_{cv}$  : coefficient de détermination en validation croisée

RMSEC : racine carrée de l'erreur de calibration ou « Root Mean Square Error of Calibration »

RMSECV : racine carrée de l'erreur de la validation croisée ou « Root Mean Square Error of cross validation »

Par rapport aux résultats trouvés par les autres auteurs cités dans le Tableau 29 sur différentes espèces, le modèle de prédiction du module d'élasticité et de l'infradensité du bois de Liquidambar sont acceptables (Tableau 29). Pour ce qui est du PSF, la qualité du modèle

de prédiction est sensiblement la même que celle du module d'élasticité et de l'infradensité du bois de Liquidambar. Jusqu'à maintenant, aucune littérature n'a mentionné un modèle de prédiction de ce paramètre. D'après les travaux de Chaix et *al* (2010), le retrait tangentiel de Liquidambar peut être prédit par SPIR avec un RPD de 3, cependant, son modèle a été élaboré avec seulement 35 échantillons contre 185 dans notre étude. Par rapport au modèle de prédiction des retraits du bois de teck, celui de notre étude a un RPD proche mais les coefficients de détermination de notre étude sont plus faibles par rapport aux modèles concernant le teck. Ceci est dû à la faible variabilité du retrait de Liquidambar par rapport au bois de teck. En effet, les travaux de Schimleck et *al* (2003) ont mentionné que pour qu'un modèle soit efficace, il faut que les mesures réelles effectuées intègrent toutes les sources de variabilités possibles.

La plupart des bois du genre Eucalyptus, Pinus et Teck ont des quantités d'extractibles supérieures à celles du genre Liquidambar (Tableau 21). A cet effet, il est fort possible que les extractibles aient joué un grand rôle sur la qualité des modèles par SPIR vu que les spectres d'absorption sont liées aux liaisons chimiques à l'intérieur du bois. De plus, les travaux de Narayanamurti et *al* (1962) ont rapporté que les extractibles ont des effets sur les propriétés physico-mécaniques de son bois.

Tableau 29 : Quelques modèles de prédiction des propriétés du bois par SPIR

Essence	Propriétés	R <sup>2</sup> c	R <sup>2</sup> cv ou R <sup>2</sup> p	Méthode de validation	RPD	Source
<i>Pinus pinaster</i>	Densité	0,92	0,90	Croisée	3,2	Alves et <i>al</i> , 2012
<i>Eucalyptus tereticornis</i>	EL	0,82	0,72	Indépendante	2,3	Kothiyal & Raturi, 2011
	Infradensité	0,81	0,75		3,0	
<i>Eucalyptus delegatensis</i>	EL	0,90	0,88	Croisée		Schimleck et <i>al</i> , 2001
	Densité	0,93	0,91			
<i>Liriodendron tulipifera</i>	Densité	0,76	0,76	Indépendante	3,5	Adedipe & Dawson-Andoh, 2008
<i>Liquidambar styraciflua</i>	Retrait radial		0,67	Croisée	1,9	Chaix et <i>al</i> , 2010
	Retrait tangentiel		0,89		3,1	
<i>Tectona grandis</i>	Retrait radial	0,86	0,72	Indépendante	1,8	
	Retrait tangentiel	0,88	0,83		2,4	

### 3-5-Comparaison des valeurs des propriétés physico-mécaniques prédites sur carottes par rapport aux valeurs mesurées par les méthodes ultrasonores et acoustiques

Les modèles de prédiction par SPIR du module de rupture en compression et en flexion, des retraits radial et tangentiel et de la dureté du bois de Liquidambar ont donné des valeurs prédites exploitables malgré la qualité moyenne des modèles de prédiction en SPIR. Par rapport aux résultats obtenus à partir des mesures directes (Bing) sur des éprouvettes de dimensions normalisées, les valeurs des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar prédites par SPIR et estimées par ultrason sur des carottes ont les mêmes distributions. Les coefficients de variations, les valeurs minimums et maximum des valeurs mesurées par les méthodes standards, prédites par SPIR et estimées par ultrason sont du même ordre. Cependant, il a été remarqué que les valeurs moyennes prédites par SPIR ou estimées par ultrason sont légèrement au-dessus des valeurs de mesures Bing. Cette différence est due à l'âge et à la qualité de l'arbre où les échantillons ont été collectés. En effet, les échantillons destinés pour les mesures Bing ont été collectées à 23 et 24 ans sur des arbres d'éclaircies alors que les carottes ont été collectées sur des arbres dominants ou co-dominants

à 25ans. De plus, les travaux de (Maeglin 1987 ; Zobel & Buijtenen, 1989; Jeffries, 2008) ont également confirmé l'influence de l'âge de l'arbre sur les propriétés physico-mécaniques.

Tableau 30 : Propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar prédites par SPIR, prédites par ultrason et mesurées par les méthodes normalisées

Méthode de mesure	Paramètre	Nombre d'observations ?	Moyenne	Ecart-type	CV(%)	Minimum	Maximum
Prédiction par Spectrométrie Proche Infra-Rouge	EL	3531	15363	2424	16	6399	23290
	EL/ $\rho$	3531	23,2	3,4	14,6	9,3	36,8
	$\sigma_F$	3531	101,7	21,6	21,2	1,6	162,3
	C	3531	48,9	4	8,2	30,1	59,9
	Dureté	3531	3,68	0,48	12,98	2,11	5,86
	Rr	3531	6,04	0,43	7,08	4,58	8,24
	Rt	3531	13,19	0,7	5,32	11,06	15,85
	Infradensité	3531	0,53	0,02	4,45	0,42	0,61
	PSF	3531	34,42	1,77	5,16	19,14	40,94
Ultrason	EL (Mpa)	1801	15621	2695	17	6786	25466
	EL/ $\rho$	1801	23,6	3,4	14,3	11,2	35,7
Mesure directe par méthode standard (BING)	EL	236	15472	2851	18	6831	23218
	EL/Mvol	233	23,3	3,5	15,2	12,6	33
	$\sigma_F$	259	104,5	23,2	22,2	27,2	152,6
	C	271	45,3	6,1	13,5	20,5	66,9
	Dureté	283	2,68	0,68	25,37	1,3	6,47
	Rr	286	5,66	0,8	14,11	3,77	9,37
	Rt	286	12,35	1,16	9,35	8,87	17,99
	Infradensité	286	0,52	0,04	7,36	0,41	0,59
	PSF	251	34,08	2,24	6,56	29,08	42,43

C : module de rupture en compression axiale

CV : coefficient de variation

EL : Module d'élasticité

PSF : Point de Saturation des Fibres

Rr : Retrait radial

Rt : Retrait tangentiel

$\rho$  : Masse volumique

$\sigma_F$  : Module de rupture en flexion longitudinale

### 3-6-Comparaison du Module d'élasticité prédit par SPIR et par UScan sur les carottes

Pour ce qui est des deux méthodes d'estimation du module d'élasticité du bois de Liquidambar, elles sont toutes deux efficaces l'une comme l'autre. En effet, la valeur moyenne, le coefficient de variation, les valeurs minimales et maximales du module d'élasticité des carottes obtenues par les deux méthodes sont du même ordre de grandeur (Tableau 31). De plus, il a été constaté un fort lien significatif ( $R^2=0,63$  ;  $N=1801$  ; au seuil de 1%) entre les deux valeurs du module d'élasticité estimé par les deux méthodes (Figure 32). En prenant comme référence le module EL-Bing, l'écart type des résidus du modèle avec EL-10 est de 950 MPa ( $N=21$ ) ; l'écart type des résidus du modèle de calibration SPIR est de 1117 MPa ( $N=236$ ). Ces écart-types sont du même ordre de grandeur et induisent une erreur de régression de 1650 MPa ( $N=1801$ ) pour le modèle UScan-SPIR (ANNEXE 7). L'erreur individuelle observée sur ces deux méthodes est comparable, cependant, le modèle de régression montre que EL-UScan est statistiquement différent de EL-SPIR ( $EL\ UScan = 0,87\ EL\ SPIR + 2416\ MPa$ ).

Tableau 31 : valeurs du module d'élasticité prédit par SPIR et estimé par UScan sur les carottes

Variable	n	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	CV (%)
EL-UScan (Mpa)	1801	6786	25466	15621	2695	17,3
EL-SPIR (Mpa)	3531	6399	23290	15363	2423	15,7

EL-UScan (Mpa) : Module d'élasticité mesuré par ultrason sur les carottes

EL-SPIR : Module d'élasticité prédit par SPIR sur les carottes

CV : coefficient de variation

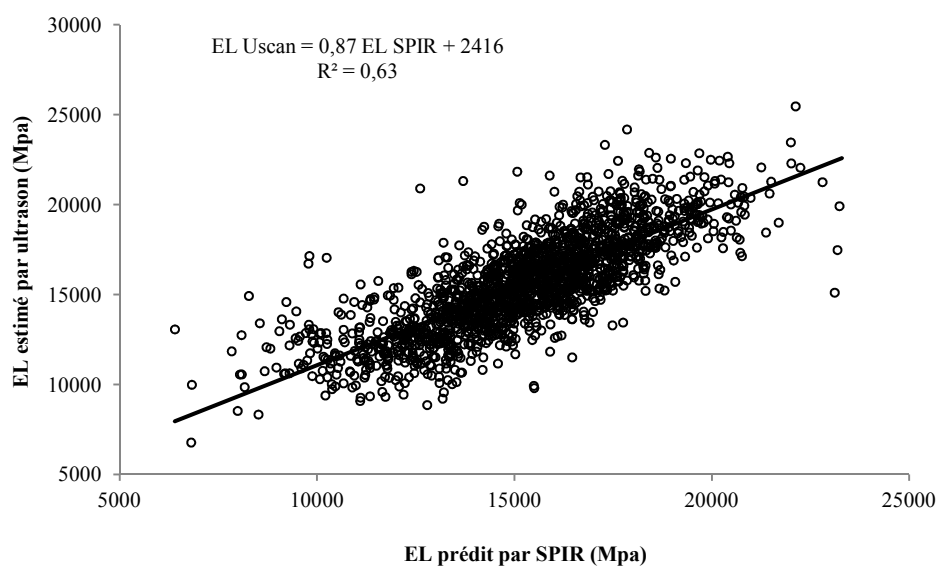


Figure 32 : corrélation entre le EL estimé par ultrason et prédit par SPIR sur les carottes de bois de Liquidambar

## CONCLUSIONS

Cette étude a été effectuée en raison de la nécessité de connaître les propriétés du bois de Liquidambar de l'essai de plantation à Mandraka sans avoir recours à l'abattage. Des arbres ont été abattus et des éprouvettes de dimensions standardisées ont été confectionnées. Les propriétés physico-mécaniques du bois ont été mesurées directement à partir de ces éprouvettes. Parallèlement, afin d'arriver à l'objectif assigné, (i) des essais de mesure du module d'élasticité par ultrason sur des petites éprouvettes et sur des éprouvettes de dimensions standard ont été réalisés. Ensuite, (ii) des étalonnages par spectrométrie proche Infra-Rouge ont été effectués par régression PLS à partir des spectres d'absorbances des échantillons de Liquidambar et de leurs propriétés physico-mécaniques. Enfin (iii), des carottes de Liquidambar ont été collectées sur le même site de plantation afin de vérifier d'une part, la fiabilité des deux méthodes vis-à-vis de la mesure directs sur à les éprouvettes standard et d'autre part, de comparer les deux méthodes d'estimation du module d'élasticité (Ultrason et SPIR). L'outil statistique comme l'analyse de variance, les statistiques descriptives (moyennes, coefficient de variation, minimum et maximum) et les graphiques ont été utilisés pour appuyer et vérifier les relations entre les données numériques.

Ce travail a mis en évidence qu'il est possible d'estimer le module d'élasticité longitudinal d'une éprouvette long de 10 mm à partir d'un dispositif ultrasonore. De plus, l'efficacité de ce dispositif est du même rang que la méthode standard qui utilise des éprouvettes de plus grandes dimensions (360x20x20 mm). Les modèles de prédictions par

spectrométrie proche infrarouge du module d'élasticité, de l'infradensité et du point de saturation des fibres sont jugés satisfaisants selon les critères  $R^2c$ ,  $R^2cv$ , RMSEC, RMSECV et RPD. Cependant, les modèles de prédictions des retraits (radial et tangentiel), de la dureté Monnin, du module de rupture en flexion et en compression du bois de Liquidambar ne sont pas satisfaisants. Ces résultats exploratoires peuvent néanmoins constituer une base pour des études plus approfondies. Les distributions des valeurs des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar, mesurées par les méthodes standards, sont du même ordre que celles estimées par la prédiction SPIR et ultrason.

Enfin, la prédiction par SPIR du module d'élasticité des carottes de bois de Liquidambar et celle du dispositif ultrasonore sont du même ordre et du même rang. Les deux méthodes sont donc tout aussi efficaces pour estimer le module d'élasticité longitudinal. Cependant, il faut noter que pour pouvoir prédire par SPIR, il faut toujours débiter par un étalonnage. Par contre, la prédiction par SPIR permet d'estimer plusieurs propriétés du bois de Liquidambar avec le même spectre alors que l'ultrason se limite seulement au module d'élasticité. Néanmoins, la mesure du module d'élasticité par ultrason est une mesure directe à l'inverse de la prédiction par SPIR.



## CHAPITRE V : ETUDE DE LA VARIABILITE ET DU CONTROLE GENETIQUE DES PROPRIETES PHYSICO-MECANQUES DU BOIS DE *LIQUIDAMBAR STYRACIFLUA* L

### I- INTRODUCTION

Le bois fait partie des matériaux naturels le plus important exploité depuis des milliers d'années. Sa composition chimique, ses propriétés physiques, mécaniques, anatomiques,... sont très variables, non seulement entre espèces mais aussi à l'intérieur de chaque espèce (Pot et *al*, 2002). A cet effet, la compréhension de cette variabilité intra spécifique est un pré-requis de l'amélioration des propriétés du bois.

Depuis les années 1990, l'amélioration génétique des arbres forestiers jusqu'alors basée sur la production de biomasse, c'est-à-dire quantité de volume par hectare, et sur la conformation des arbres, s'est appliqué à intégrer les propriétés du bois (Wei & Borralho, 1997).

Pour le cas de *Liquidambar styraciflua* L., la plupart des travaux d'amélioration génétique publiés sont principalement axés sur ses caractéristiques dendrométriques (Wright & Cunningham, 2008). De plus, sur les essais de plantation multisites réalisés par le « Commonwealth Forestry Institute » CFI depuis 1985, seule l'étude publiée par Mattos et *al* (2001) à Colombo a traité des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar (masse volumique, retrait radial et tangentiel) et de façon descriptive alors que ces essais comprennent plusieurs provenances différentes.

Pour ce qui est de l'étude de variabilité des propriétés physico-mécaniques du Liquidambar, la plupart des travaux effectués par Webb (1964) ; Jett & Zobel (1975) ; Hunter & Goggans (1968) ; Carpenter & Hopkins (1966) ; Shupe et *al* (1995) ont principalement étudié la variabilité intra-arbre de l'infradensité, du retrait et du module d'élasticité. Une partie du chapitre III de ce travail de thèse a traité la variabilité intra-arbre des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar planté à Mandraka provenant des arbres d'éclaircie. Ainsi, ces travaux informent uniquement sur la façon d'exploiter le bois mais pas sur les possibilités d'amélioration de ces propriétés. De plus, les variabilités intra-arbre des propriétés du bois de Liquidambar provenant des arbres dominants n'ont pas été considérées. Ce présent chapitre se propose ainsi d'étudier la variabilité intra-arbre des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar en tenant en compte les arbres dominants.

Grace au nombre de provenances qui ont été testées à Madagascar, il est possible de savoir si l'origine géographique a une influence sur les propriétés physico-mécaniques et leur variabilité et d'évaluer si les facteurs environnementaux et génétiques les contrôlent.

Dans cet objectif, ce travail vise aussi à étudier le contrôle génétique des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar planté à Mandraka, et d'aider à la stratégie d'amélioration et de sélection sur les valeurs des propriétés physico-mécanique du bois de Liquidambar à Mandraka.

## **II- MATERIEL ET METHODES**

### **2-1- Matériel d'étude et paramètres mesurés**

Cette étude est axée sur l'essai de provenances de Mandraka planté en 1986. A la plantation, l'essai de provenances de *Liquidambar styraciflua* à Mandraka était composé de 4 blocs (répétitions) complets randomisés constitués de 12 provenances. Cependant, à cause des difficultés d'accès, certaines parcelles n'ont pas pu être plantées ou ont subi des dégâts. En conséquence, l'étude des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar repose sur 9 des 12 provenances plantées dans le site.

Deux types d'échantillonnages ont été réalisés pour déterminer d'une part les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar et d'autre part d'étudier les variabilités intra-arbre, intraspécifique et leur contrôle génétique. Premièrement, un échantillonnage par prélèvement d'éprouvettes a été effectué. A cet effet, 297 éprouvettes provenant de 54 plateaux diamétraux, à raison d'un plateau par arbre, ont été prélevées et utilisées pour déterminer les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar (chapitre III, paragraphe 2-3). Les 54 plateaux proviennent des arbres d'éclaircie. Vingt-sept (27) arbres, âgés de 23 ans, ont été abattus en 2009 dans le bloc I (bas de pente) et les 27 restant, âgés de 24 ans, ont été coupés en 2010 dans le Bloc III (sur la crête). La découpe des échantillons est détaillée dans le chapitre III, paragraphe 2-1. Ensuite, afin d'être plus représentatif, un échantillonnage par prélèvement de carottes de bois a été réalisé pour les arbres dominants et co-dominants dans les 4 blocs. Quatre-vingt-dix-neuf (99) carottes diamétrales ont été prélevées à raison d'une carotte par arbre et 3 arbres par provenance et par bloc.

Les carottes ont été extraites suivant la ligne de pente du terrain. Comme dans le chapitre III, ce type d'échantillonnage doit permettre de prendre en compte, s'il existe, le bois de tension et le bois normal. Sur les 99 carottes de bois, les propriétés physico-mécaniques de Liquidambar ont été prédites par « SPIR » Spectrométrie Proche Infra Rouge et par mesure ultrasonore (la méthodologie de mesure est décrite dans le chapitre IV). Sur les carottes ou sur

éprouvettes, les mesures ou l'estimation des propriétés physico-mécaniques ont été réalisées de la moelle à l'écorce. La masse volumique ( $\rho$ ), le module d'élasticité ( $E$ ), le module de cisaillement ( $G$ ), le module de rupture en flexion longitudinale ( $\sigma_F$ ), le module de rupture en compression axiale ( $C$ ), la dureté Monnin ( $N$ ), le retrait radial ( $R_r$ ) et tangentiel ( $R_t$ ), l'infradensité (Infra) et le Point de Saturation des Fibres (PSF) ont été considérés, mesurés ou prédits dans cette étude.

## 2-2-Analyses des données

Les données ont été traitées de la façon décrite dans les chapitres II, et III c'est-à-dire à partir des statistiques descriptives, des tests de normalités de Shapiro-Wilk et des tests d'homogénéité de variance par le test de Bartlett et la corrélation. Ensuite, des analyses de variances ont été réalisées à partir de la valeur de la masse volumique ( $\rho$ ), du module d'élasticité ( $E$ ), du module de cisaillement ( $G$ ), du module de rupture en flexion longitudinale ( $\sigma_F$ ), du module de rupture en compression axiale ( $C$ ), de la dureté Monnin ( $N$ ), du retrait radial ( $R_r$ ) et tangentiel ( $R_t$ ), de l'infradensité (Infra) et du Point de Saturation des Fibres (PSF) (ANNEXE 3).

Pour la modélisation de la variabilité intra-arbre des propriétés physico-mécaniques des arbres du bois de Liquidambar, des analyses de régression (linéaire, logarithmique et polynomial) ont été effectuées avec le logiciel libre R (R Development Core Team, 2012) dont la distance, en pourcentage, par rapport à la moelle des mesures effectuées est prise comme variable explicative. Pour l'analyse de variance, le modèle statistique est du type (Equation 30) :

Equation 30)

$$Y_{ijl} = \mu + B_i + P_j + A_l + (BP)_{ij} + \varepsilon_{ijl}$$

Où

$i = 1, \dots, I$ ,  $I$  : nombre de bloc

$j = 1, \dots, J$ ,  $J$  : nombre de provenance

$l = 1 \dots L$ ,  $L$  : nombre d'arbre (ou carotte)

$Y_{ijl}$  : valeur phénotypique mesurée sur l'individu de provenance  $J$  sur le bloc  $I$  de l'arbre  $L$

$\mu$  : moyenne globale

$B$  : effet fixe du bloc de répétition avec comme variance  $\sigma^2_B$

$P$  : effet aléatoire de la provenance avec comme variance  $\sigma^2_P$

$A$  : effet aléatoire de l'arbre (ou carotte) de variance  $\sigma^2_A$

BP : effet d'interaction aléatoire bloc-provenance avec comme variance  $\sigma^2_{BP}$

$\varepsilon_{ij}$  : résidus à effet aléatoire de variance  $\sigma^2_\varepsilon$

Comme dans le chapitre I et II, l'héritabilité  $h^2_G$  a été estimée suivant la formule de Nanson (1970) (Equation 31)

$$\text{Equation 31)} \quad h^2G = \frac{\sigma^2_Y}{\sigma^2_Y + \frac{\sigma^2_\varepsilon}{I}} = \frac{A - C}{A} = 1 - \frac{1}{F}$$

Nanson (1970)

Tableau 32 : Tableau d'analyse de variances

Sources	Degré de liberté (ddl)	Carrés Moyens (CM)	F calculée
Provenances	J - 1	$\sigma^2_P (A)$	$F = \sigma^2_P / \sigma^2_\varepsilon$
Blocs	I - 1	$\sigma^2_B (B)$	$\sigma^2_B / \sigma^2_\varepsilon$
Résidus	(J-1) (I-1)	$\sigma^2_\varepsilon (C)$	
Total	IJ-1		

A =  $\sigma^2_P$  : variance intra provenance

AB =  $\sigma^2_B$  : variance intra bloc

C =  $\sigma^2_\varepsilon$  : variance des résidus ou variance totale

J : nombre de provenances

I : nombre de répétitions (bloc)

### III- RESULTATS ET DISCUSSION

#### 3-1-Variabilité intra arbre des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar dominant à Mandraka

Toutes les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar des arbres dominants varient de la moelle (0%) à l'écorce (100% de la distance). Ainsi, la masse volumique augmente linéairement de la moelle à l'écorce (Figure 33 A). Le module d'élasticité, le module spécifique, le module de rupture en compression, le module de rupture en flexion et l'infradensité augmente de façon logarithmique de la moelle à l'écorce (Figure 33 B et Figure 34 A, B, C, D). L'augmentation de forme logarithmique signifie qu'à une certaine distance de la moelle, la valeur de ses propriétés commence à se stabiliser ; ce qui correspond à la phase adulte de l'arbre et à sa maturité. Le point de saturation des fibres, enregistre une diminution de forme logarithmique suivant l'âge cambial (Figure 33 C). Cependant, il ne descend pas au-dessous d'un certain seuil (aux alentours de 33%). Pour la dureté Monnin, sa variation suivant l'âge cambial suit une courbe polynômiale d'ordre 2, c'est-à-dire que la variation de la dureté change au moins deux fois de signe. La Figure 33 D, montre qu'elle diminue jusqu'à environ 50 % de la distance par rapport à la moelle, puis elle commence à augmenter jusqu'à atteindre

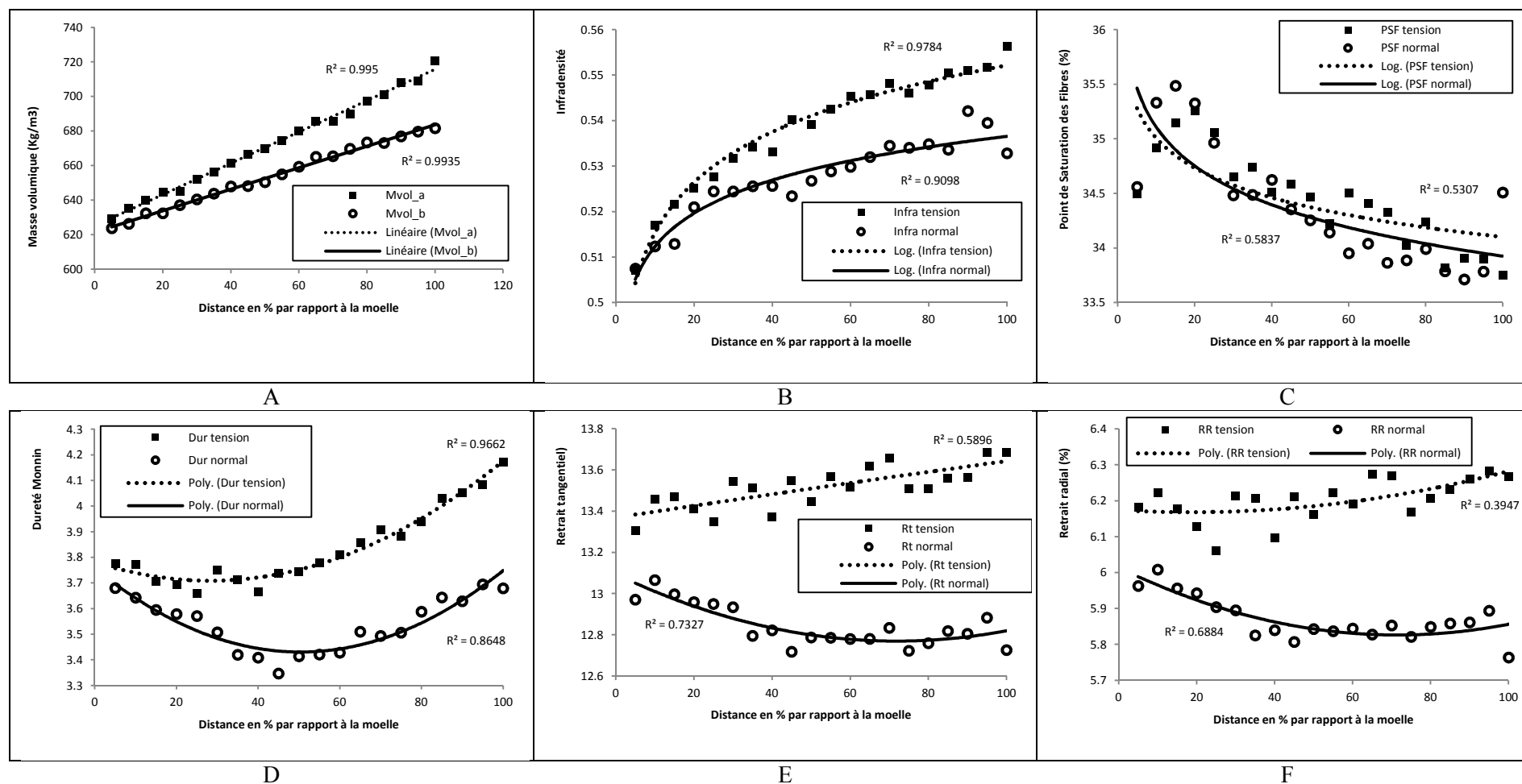
une valeur maximale près de l'écorce. Pour les retraits (radial et tangentiel), leurs variations dans l'arbre suivent aussi l'allure d'une fonction polynomiale d'ordre 2 (Figure 33 E et F).

Les variations dans l'arbre de ces propriétés n'ont pas le même degré dans les arbres dominants. En effet, par ordre décroissant, le module de rupture en flexion et le module d'élasticité varient avec le rayon de 37% et 28% respectivement. Ensuite, le module d'élasticité est plus variable de la moelle à l'écorce que le module spécifique qui varie de 20 %. Le module spécifique est plus variable de la moelle à l'écorce que le module de rupture en compression qui est de 12%. Puis, le module de rupture en compression est plus variable que la masse volumique et l'infradensité dont leurs variations radiales sont de l'ordre de 10% et 7%. Enfin, le PSF, le retrait radial et le retrait tangentiel ont enregistré une variation radiale faible de l'ordre de 4,5%, 4% et 3% respectivement.

A part la variation des propriétés physico-mécaniques du bois des arbres dominants de Liquidambar à Mandraka, nous avons enregistré aussi des tendances de variation radiale des valeurs de certaines propriétés physico-mécanique de part et d'autre de la moelle. Pour la masse volumique, le module d'élasticité, le module spécifique, l'infradensité et la dureté, cette différence de tendance suit la même dynamique de la moelle à l'écorce mais la différence des valeurs de part et d'autre de la moelle est très marquée. Pour le point de saturation des fibres, le module de rupture en flexion et en compression, la différence des valeurs de part et d'autre de la moelle n'est pas très remarquable. Enfin, pour le cas des retraits (tangentiel et radial), la tendance des valeurs de part et d'autre de la moelle ne sont pas les mêmes, tout comme l'allure de la variation de la moelle à l'écorce. Cependant, malgré cette différence d'allure pour les retraits, ses variations (de la moelle à l'écorce) sont presque insignifiantes. Les variations radiales des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar provenant des arbres dominant laissent à supposer qu'ils contiennent du bois de tension et du bois normal. En effet, les travaux de Maeglin (1987) ; Jourez (1997) et Ruelle (2006) ont démontré que les distributions de certaines propriétés physico-mécaniques du bois ne sont pas identiques de la moelle à l'écorce pour les bois normaux et les bois de tensions ce qui est le cas rencontré ici pour les arbres dominant et co-dominants. Il est donc important de considérer la présence de ces types de bois dans sa future utilisation (dès les découpes et/ou aux sciages des avivés).

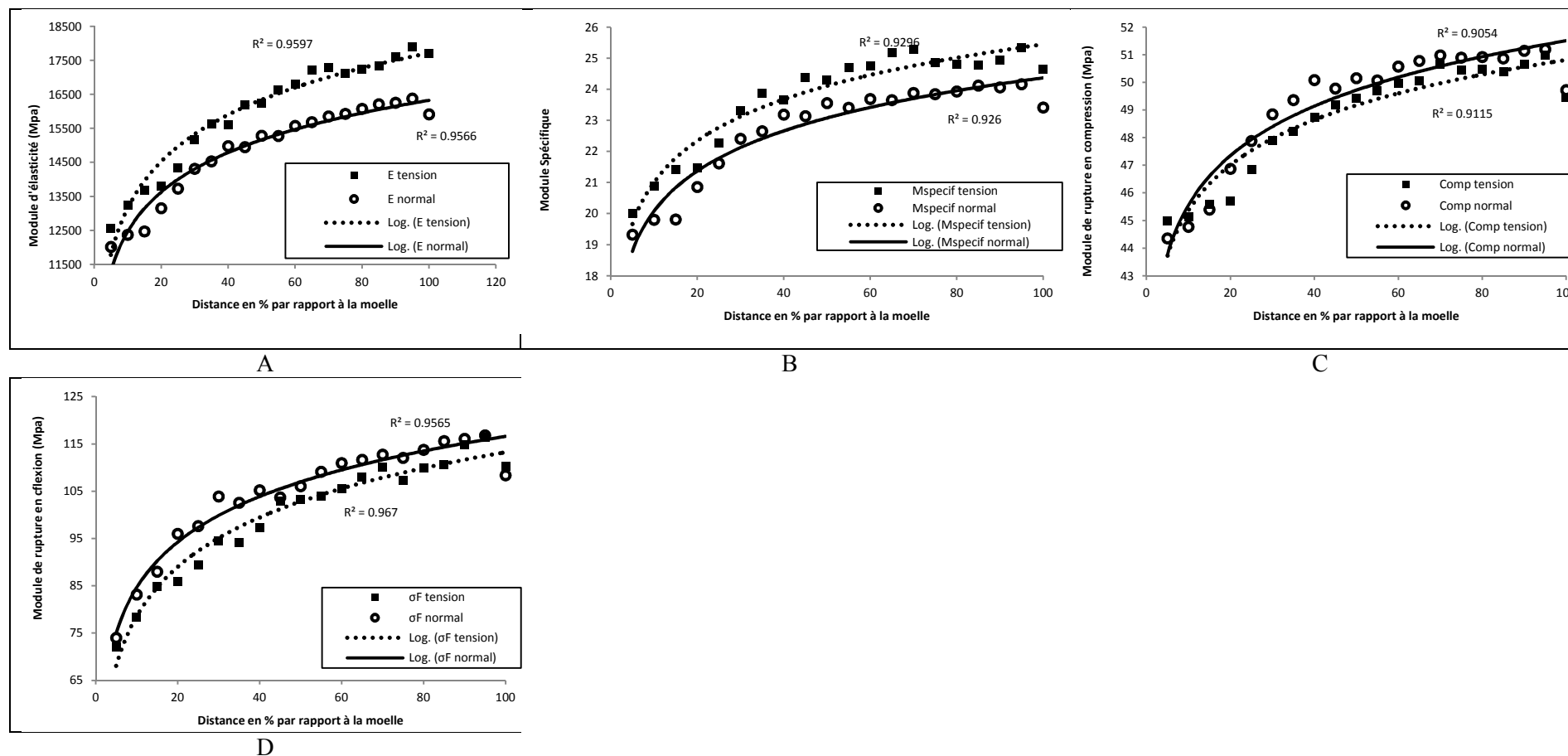
L'allure des variations radiales des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar provenant des arbres d'éclaircie (chapitre III, paragraphe 3-6) et des arbres dominants et/ou co-dominants sont les mêmes. Cependant, pour chaque propriété, les arbres

d'éclaircie montrent une variabilité radiale plus importante pour ces propriétés physico-mécaniques que les arbres dominants et/ou co-dominants (ANNEXE 5).



$R^2$ =coefficient de détermination/X% : pourcentage de variation de la moelle à l'écorce

Figure 33 : variation radiale des propriétés physiques du bois des arbres dominants et co-dominants de Liquidambar à Mandraka



$R^2$ =coefficient de détermination/X% : pourcentage de variation de la moelle à l'écorce

Figure 34 : variation radiale des propriétés mécaniques du bois des arbres dominants et co-dominants de Liquidambar à Mandraka



### 3-2-Variabilité inter-arbre et héritabilité des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar

Toutes les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar, considérées dans l'étude, sont influencées significativement, au seuil de 0,1% à 1%, par la provenance, sauf les retraits (radial et tangentiel) des bois d'éclaircie (Tableau 33). Les blocs aussi ont des impacts significatifs sur la valeur moyenne des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar sauf pour le cas des retraits (radial et tangentiel), de la dureté, du module de cisaillement et du module de rupture en flexion des arbres d'éclaircie. Le génotype et la combinaison de l'effet de la topographie et de la fertilité du sol affectent donc les valeurs des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar (ANNEXE 6).

Les moyennes par provenance des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar sont plus variables que celles dues à l'effet bloc que ce soit pour les arbres d'éclaircie ou pour les arbres dominants. Pour les arbres d'éclaircie, la différence de masse volumique entre la provenance la plus faible et celle la plus élevée est de 11% contre 5% sur les blocs de répétitions. Pour le module d'élasticité, cette différence est de 22% contre 12,5%. Pour le module de rupture en flexion, elle est de 25% contre 2,3%. Enfin, celle de la dureté est de 31% contre 1%. La différence due aux blocs de répétition pour les arbres dominants est du même ordre que celle des blocs I et III pour les arbres d'éclaircie.

L'effet provenance est plus marqué sur les arbres d'éclaircie que sur les arbres dominants ou co-dominants. En effet, l'effet provenance pour les arbres dominants a entraîné une différence de 7%, 9%, 12% et 9% respectivement sur la masse volumique, le module d'élasticité, le module de rupture en flexion et la dureté entre la moyenne de la provenance la plus faible et celle la plus élevée. Cependant, les valeurs d'héritabilité montrent que toutes les propriétés physico-mécaniques des arbres co-dominants sont plus fortement héritable et sont donc susceptibles d'être sous un fort contrôle génétique ( $h^2_G$  : 0,77 à 0,99) alors que les retraits des arbres d'éclaircie sont faiblement héritable ( $h^2_G$  : 0,28 et 0,43) et leur module de cisaillement et module de rupture en compression axiale sont moyennement héritable ( $h^2_G$  : 0,62 et 0,69).

Tableau 33 : Variabilité inter arbre des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar

	Propriétés physico-mécaniques mesurées											
	ddl	$\rho$	E	M spécifique	PSF	Infra	C	$\sigma_F$	N	Rt	Rr	G
Nombre de mesure (n)		233	236	233	254	286	271	262	283	286	286	236
Bloc	1	***	***	***	***	***	*	NS	NS	NS	NS	NS
Provenance	8	***	***	***	***	***	*	***	***	NS	NS	**
Arbre	53	**	**	*	**	**	***	NS	**	NS	NS	NS
Bloc*Provenance	24	***	NS	NS	NS	**	NS	NS	**	NS	NS	**
$h^2_G$		0,82	0,73	0,77	0,71	0,82	0,59	0,84	0,84	0,28	0,43	0,62
	Propriétés physico-mécaniques prédites par SPIR											
	ddl	$\rho$	E	M spécifique	PSF	Infra	C	$\sigma_F$	N	Rt	Rr	G
Nombre de mesure (n)		2532	2532	2532	2532	2532	2532	2352	2532	2532	2532	
Bloc	3	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Provenance	8	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Carotte	98	**	*	***	*	***	***	***	*	*	*	
Bloc*Provenance	24	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
$h^2_G$		0,99	0,92	0,97	0,78	0,77	0,93	0,92	0,96	0,87	0,94	

E : module d'élasticité  
 G : module de cisaillement  
 $\sigma_F$  : Module de rupture en flexion 4 points  
 C : Module de rupture en compression axiale  
 N : dureté Monnin  
 M spécifique : module spécifique  
 Rr : retrait radial  
 Rt : retrait tangentiel  
 Infra : infradensité  
 PSF : point de saturation des fibres  
 ddl : degré de liberté  
 n : nombre d'éprouvette  
 $h^2_G$  : héritabilité au sens large

NS : non significative

\*différence de moyenne significative au seuil de 5%

\*\* : différence de moyenne significative au seuil de 1%

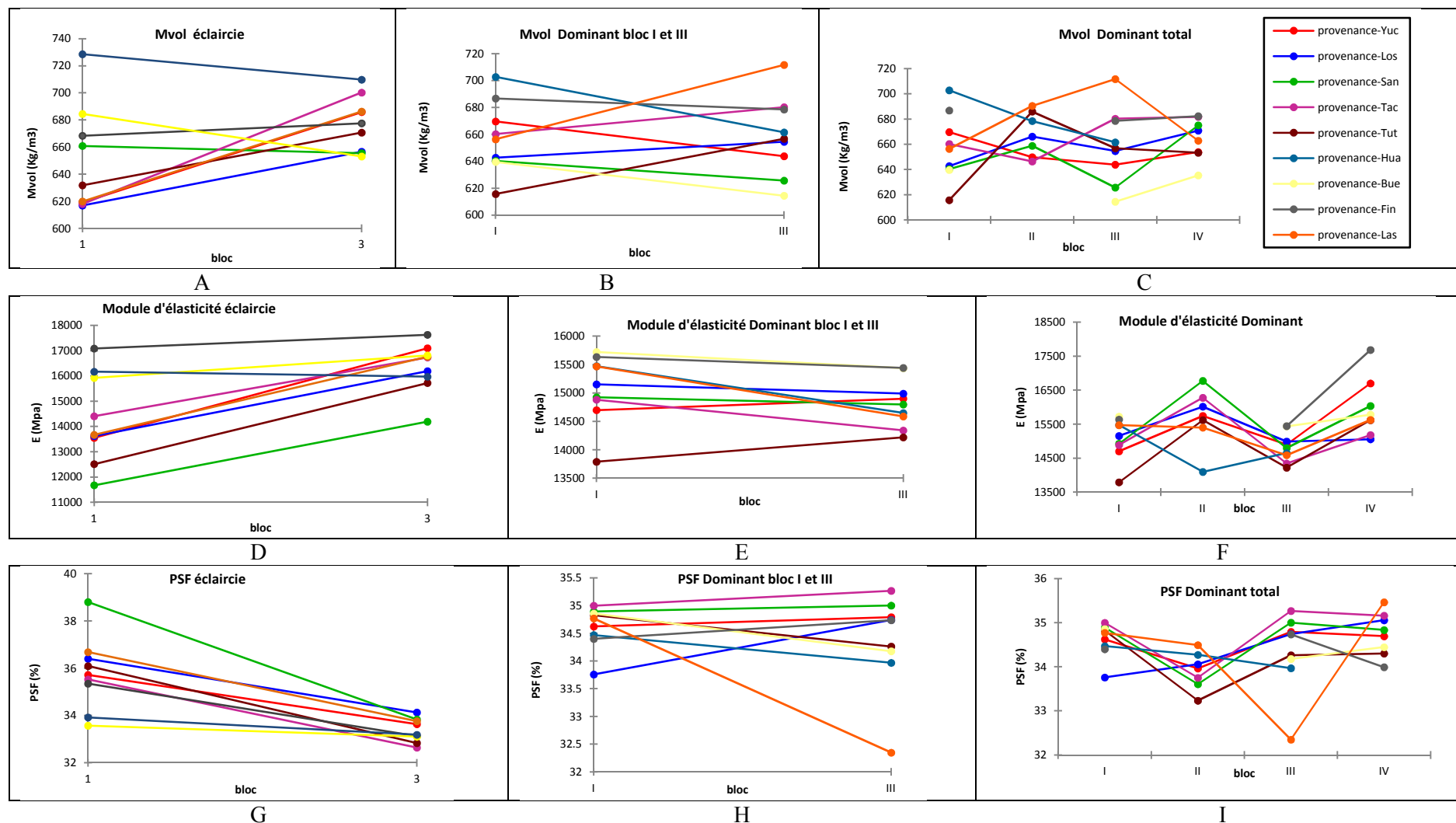
\*\*\* : différence de moyenne significative au seuil de 0,1%

Pour les arbres dominants, le classement des provenances suivant leurs propriétés physico-mécaniques n'est pas le même dans chaque bloc (Figure 35 : B, C, E, F, H et I). Cette différence est mise en évidence par l'effet significatif de l'interaction bloc-provenance sur les valeurs des propriétés prédites. Par contre, pour les arbres d'éclaircie, seuls la masse volumique, l'infradensité, la dureté et le module de cisaillement sont affectés par l'interaction bloc-provenance (Tableau 33, Figure 35 : A, D et G).

La provenance est le premier facteur important de la variation inter-arbre des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar. En effet, tous les géotypes, même s'ils sont plantés dans un milieu ne se comportent pas de la même façon. Dans le cas de Liquidambar, ce constat est observé plutôt sur les caractéristiques de croissance. En effet, Shimizu & Spir (1999) et 2002; Mendizabal et al (2009) ; Sebbenn et al (2007) ont tous rapporté que l'effet provenance est significatif sur la croissance en diamètre et en hauteur. D'autres travaux sur d'autres essences feuillues ont rapporté que la densité, le retrait radial et tangentiel, et le

module d'élasticité, jugés comme principales propriétés du bois, sont toutes influencées également par l'effet génotype ou provenance (Rudman 1970 ; Zamudio et *al*, 2002 ; Waghorn et *al*, 2007 ; Lasserre et *al*, 2009). Notre étude montre aussi un effet significatif de la provenance sur le module de cisaillement, la dureté, le PSF, le module de rupture en flexion et en compression. Ainsi, la provenance n'a pas le même effet sur les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar sur le site de Mandraka.

Les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar provenant des arbres dominant sont influencées par l'effet de la topographie et de la fertilité du sol contrairement à ce qui a été rapporté par Ohta et *al* (1983) et de Cao et *al* (2008). Les propriétés mécaniques du bois des arbres dominants et co-dominants sont plus sensibles à leur environnement extérieur que celles des arbres d'éclaircie. En effet, dans le chapitre III, il a été rapporté que les propriétés mécaniques du bois de Liquidambar provenant des arbres d'éclaircies sont moins affectées par l'effet bloc (topographie et fertilité du sol). Il est donc très important de bien distinguer les arbres dominants et co-dominants par rapports aux arbres dominés lors de leur amélioration et aussi à exploitation.



E : module d'élasticité

PSF : Point de saturation des fibres

Mvol : Masse volumique

Figure 35 : Effet de l'interaction bloc x provenance sur les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar

## CONCLUSIONS

Ce travail vise à évaluer la variabilité intra arbre, inter arbre ainsi que l'héritabilité et le contrôle génétique des propriétés physico-mécaniques afin de contribuer à la stratégie d'amélioration pour une utilisation optimale du bois de Liquidambar. Il a été réalisé à partir de deux groupes d'individus de l'essai de provenances de Liquidambar à Mandraka dont : (1) l'un est constitué d'arbres dominés a priori avec une conformation moyenne (arbre de 3<sup>ème</sup> éclaircie) et, (2) l'autre groupe constitué d'arbres dominants ou co-dominants et de bonne conformation. Pour les arbres d'éclaircies, deux blocs de répétitions dont l'un en bas de pente (bloc I) et l'autre sur la ligne de crête (bloc III), ont été pris en compte. Pour les arbres dominants, les 4 blocs de répétition de l'essai de provenances ont été considérés. La masse volumique, le module d'élasticité, le module de cisaillement, le module spécifique, le module de rupture en flexion et en compression, la dureté Monnin, l'infradensité, le point de saturation des fibres et les retraits (radial et tangentiel) ont été considérés. Ces propriétés ont été mesurées suivant des normes utilisant des éprouvettes standardisées pour les arbres d'éclaircies. Pour les arbres dominants, les propriétés ont été prédites par calibration en spectrométrie proche infra rouge (SPIR) et par mesure ultrasonore, à partir des carottes. Dans les deux cas, les mesures ont pu intégrer la variabilité radiale (de la moelle à l'écorce) et les échantillons ont été collectés de façon à prendre en considération l'inclinaison de l'arbre et/ou la pente du terrain.

Toutes les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar des arbres dominants varient selon le rayon. Cependant, certaines propriétés telles que la masse volumique et l'infradensité augmentent de façon linéaire de la moelle à l'écorce, d'autres comme le module d'élasticité, le module spécifique, le module de rupture en compression, le module de rupture en flexion et l'infradensité augmentent de façon logarithmique. A l'inverse, le PSF diminue de façon logarithmique. Ces variations intra arbre n'ont pas le même degré. Par rapport aux arbres d'éclaircie, la variation radiale de ces propriétés physico-mécaniques est moins marquée. Cette étude montre qu'il existe du bois de tension même sur les arbres dominants, de bonne conformation, pour le cas de Liquidambar. Nous préconisons ainsi de réaliser des sélections sur les arbres dominants.

Toutes les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar, considérées dans l'étude, sont influencées significativement par la provenance, excepté les retraits (radial et tangentiel) des bois d'éclaircie. Les propriétés physico-mécaniques des arbres co-dominants et dominants sont ainsi fortement héritable et sous fort contrôle génétique par rapports aux propriétés physico-mécaniques des arbres d'éclaircie. Les propriétés mécaniques du bois de Liquidambar provenant des arbres d'éclaircies sont moins affectées par l'effet bloc (topographie

et fertilité du sol) que les propriétés mécaniques du bois des arbres dominants qui réagissent significativement à l'environnement extérieur.

Pour une amélioration génétique efficace, basée sur les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar, nous préconisons de réaliser des sélections au niveau provenance sur des arbres dominants ou co-dominants. Néanmoins, il ne faut pas oublier que certaines propriétés physiques et mécaniques peuvent aussi être influencées par la vitesse de croissance de l'arbre, comme ce qui a été montré dans le chapitre III. Toutefois, cela n'empêche pas de réaliser des sélections individuelles après une sélection au niveau provenance vue le niveau de variabilité inter arbre des propriétés du bois. Ainsi, pour l'amélioration génétique de l'espèce, nous pouvons considérer et intégrer avec la forme et la croissance, les propriétés physico-mécaniques comme critères de sélection.

## **PARTIE IV : DISCUSSION GENERALE**

L'expérimentation de Liquidambar à Mandraka n'est pas exactement adaptée pour une estimation de l'héritabilité. Dans ce cas, la formule de Nanson (1970) est la mieux adaptée à l'expérimentation à Mandraka car elle avait permis d'avancer un indice sur le déterminisme génétique des caractères étudiés même en l'absence d'essai de clonage pour la détermination exacte de l'héritabilité au sens large. A cause de l'expérimentation à Mandraka (répétition à bloc incomplète, randomisation, essai sur un seul site, présence d'individus plein frères ou pas) et les erreurs liées à la prédiction des propriétés physico-mécaniques, la variance totale des caractères étudiés va diminuer entraînant une surestimation de l'héritabilité.

Le classement des provenances de Liquidambar s'applique seulement sur l'essai à Mandraka alors que pour un essai de provenances, il est important de réaliser des essais multisites afin de pouvoir appréhender l'effet site et l'interaction génotype x site. Néanmoins, l'essai de Mandraka comporte 4 blocs, dont les conditions environnementales sont différentes d'un point de vue de la fertilité du sol, de la topographie, de l'exposition au vent et de l'ensoleillement, lesquelles ont été pris en compte dans cette étude. Ces conditions ne sont pas aussi variables que pour deux sites réellement différents mais les résultats sont toutefois exploitables pour des régions dont les conditions environnementales sont proches de celles de Mandraka. Pour les caractéristiques dendrométriques (hauteur et diamètre), l'effet bloc n'est pas significatif et l'interaction bloc x provenance n'est significative que pour la hauteur à 13 ans. Nous ne pouvons pas ainsi avancer que la variabilité des caractéristiques dendrométriques de Liquidambar est seulement d'origine génétique. En effet, les 4 blocs ont, certes, des conditions environnementales différentes mais il se pourrait que la variabilité de ces conditions ne soit pas suffisamment forte pour mettre en évidence des effets statistiquement significatifs.

Lors de la collecte des graines de Liquidambar, les arbres-mères sont constitués de 3 arbres de tailles différentes par provenance suivant les 4 blocs de répétition. Cependant, l'effet de la taille de ces arbres-mères n'a pas été pris en compte dans cette étude alors qu'il s'agit d'une source de variabilité potentielle à prendre en compte pour la sélection d'arbres destinés à la production de semences. La récolte des fruits a été réalisée sur une seule période alors que la période de maturation des fruits suivant les provenances n'est pas la même, étant donnée la présence des fruits à l'état vert pour certaines provenances. Ainsi, les graines qui ont été récoltées peuvent ne pas avoir la même maturité, influençant alors leur germination. Lors de cette étude, l'effet de la paternité n'a pas été pris en compte puisque les graines sont issues d'une pollinisation libre. Pourtant, la prise en compte de l'effet paternel aurait pu varier nos résultats. Toutefois, l'effet paternel de Liquidambar est délicat à appréhender car un pied



d'arbre peut féconder sur un rayon de 60 m allant même jusqu'à 180 m (Pamela et *al*, 2011) alors qu'actuellement les arbres de Liquidambar de Mandraka sont en moyenne équidistants de 6 m.

Lors du suivi de la croissance juvénile de Liquidambar, chaque plant a été placé sur un support plastique de 10 cm de diamètre et accolés les uns aux autres. Avec ce type d'expérimentation, des effets liés à la concurrence et à la compétition peuvent exister. Par conséquent, la variabilité de la croissance peut non seulement être d'origine génétique mais aussi liée à ces concurrences et compétitions. Dans les futures recherches, il est donc recommandé de séparer chaque plant avec une plus grande distance. Les suivis des jeunes plants et l'estimation du taux de survie au stade pépinière ne permettent pas de se prononcer sur la réussite de ces jeunes plants en reboisement. Pour que le reboisement ou la vulgarisation de Liquidambar à Madagascar soit effective et efficace, il est conseillé de continuer les suivis post pépinière en plantation.

Tous les échantillons de bois de Liquidambar ont été collectés à 1,20 m au-dessus du sol quand les arbres étaient sur pied. Par conséquent, la variabilité des propriétés physico-mécaniques qui pourrait exister en fonction de la position des échantillons le long du tronc n'ont pas été traités dans ce travail. Lors de l'abattage des arbres, l'angle de l'inclinaison du tronc n'a pas été relevé, ni la pente du terrain où il a été planté alors que ces informations peuvent apporter des explications complémentaires sur la variabilité des propriétés du bois. Ensuite, tous les échantillons ont été collectés suivant l'inclinaison de l'arbre ou de la pente du terrain pour pouvoir apprécier la présence de bois de tension. Afin d'être plus représentatif, l'échantillonnage des éprouvettes devrait être réalisé à la fois sur les parties inclinées de l'arbre (ou suivant les lignes de pentes du terrain) et sur les parties non inclinées du tronc (ou parallèlement à la courbe de niveau du terrain). Lors de la caractérisation des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar, les protocoles normalisés exigent que les échantillons soient exempts de défauts et avec une orientation des cernes précise (les éprouvettes doivent être de droit fil, à faces rigoureusement perpendiculaire entre elles). L'axe longitudinal de l'éprouvette doit être parallèle au fil du bois). Cependant, ces conditions ne sont pas toujours réunies et respectées. Pour des raisons techniques et pour avoir un nombre suffisant d'éprouvettes, certains de nos échantillons présentent parfois des défauts que nous avons jugés mineurs (nœuds inférieurs à 5 mm) et les éprouvettes de 360x20x20 mm n'étaient pas toujours de droit fil. Il est ainsi possible que le module d'élasticité obtenu ait été influencé.

Les résultats qui ont été obtenus à l'issu de ce travail permettent de dire que (1) le Liquidambar est adapté aux contextes des reboisements malgaches en se basant sur sa germination et sa croissance en plantation, (2) son bois est exploitable en tant que bois d'œuvre à partir de 20 ans (plantation sur le versant Est de Madagascar) et peut répondre au marché malgache de bois. Dans cette optique, il est possible d'envisager la valorisation du bois de Liquidambar, soit pour un usage structure, à condition qu'il soit protégé des risques biologiques (en fonction de sa classe d'emploi) ; soit pour un usage intérieur (ameublement, placage, agencement en prenant soin de le protéger des insectes). Cependant pour mieux déterminer d'autres utilisations du bois de Liquidambar, des essais complémentaires sont nécessaires (usinage, finitions, collage, analyses chimiques, pouvoir calorifique).

Les variations radiales des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar évoquées dans ce travail vont de la moelle à l'écorce sans qu'une distinction ait pu être faite entre l'aubier et le bois de cœur. Si le suivi des plantations se poursuit dans le temps, d'autres prédictions de propriétés à partir de carottes permettront d'appréhender d'autres variations radiales et améliorer le diagnostic pour l'usage du bois. Les modèles de calibrations par Spectrométrie Proche Infra-Rouge (SPIR) ont été réalisés à partir des valeurs des spectres et des propriétés physico-mécaniques des bois provenant des arbres d'éclaircie. Ces modèles ont été ensuite utilisés sur des carottes provenant d'arbres dominants. Les bois des arbres d'éclaircies et ceux des dominants n'ont sans doute pas les mêmes gammes de variation. Ainsi, les modèles SPIR et les valeurs prédites méritent alors d'être améliorés en intégrant des échantillons de bois collectés à un âge plus avancé.

Lors de la comparaison du module d'élasticité mesuré par UScan et par BING®, deux types de longueur d'éprouvettes seulement ont été pris en compte (10x20x20 mm et 360x20x20 mm) alors que l'effet poisson est plus prononcé quand l'éprouvette est de petite dimension (rapport épaisseur/longueur élevé). Pour pouvoir valider l'efficacité de l'outil UScan, il serait recommandé dans les futures études de considérer beaucoup plus de plages de longueur d'échantillons. Nous avons prouvé avec du bois de Liquidambar qu'il était possible d'estimer avec UScan le module d'élasticité des échantillons longs de 10 mm. De plus, les valeurs qui en sont issues sont comparables avec celles obtenues par BING®. Lors de la validation de l'outil BING® vis-à-vis de la méthode flexion statique 4 points et 3 points (Brancheriau & Baillères, 2002 ; Brancheriau *et al*, 2002) sept essences de bois ont été utilisées. Ainsi, afin de valider la répétabilité et la reproductibilité de la mesure du module par UScan, il est recommandé de répéter nos protocoles expérimentaux sur d'autres essences. Enfin, il faut retenir que pour pouvoir établir le modèle de prédiction par SPIR, il faut avoir

des valeurs de référence qui sont obtenues à partir des méthodes standardisées. De plus, les échantillons de calibrations devraient être les plus représentatifs possible de la ressource. Dans le cas du dispositif ultrasonore donnant la mesure du module d'élasticité, il n'est pas nécessaire d'avoir des mesures de référence contrairement à la prédiction par SPIR.

Les résultats de ce travail, montrent que les modèles de prédictions par SPIR des retraits (radial et tangentiel), de la dureté Monnin, du module de rupture en flexion et en compression du bois de Liquidambar peuvent seulement être utilisés pour des études préliminaires. Ceci est peut-être dû, comme nous l'avons évoqué, à la non prise en compte des bois juvéniles et bois matures et de la différence entre aubier et duramen. Néanmoins, nous avons utilisés ces modèles SPIR pour mettre en évidence les variabilités radiales de ces propriétés qui semblent suivre les mêmes tendances de que celles des bois d'éclaircies. Les variations radiales observées au niveau des arbres dominants et co-dominants, à partir des carottes, montrent beaucoup plus de régularité que celles observées sur les arbres d'éclaircies. Ceci est dû (1) à la différence de comportement de ces deux groupes d'arbres et (2) aux découpes des échantillons des arbres d'éclaircies. En effet, sur les arbres d'éclaircies, il n'est pas possible d'avoir une distance régulière des échantillons vis-à-vis de la moelle alors qu'avec les carottes, les mesures spectrales et donc les prédictions ont été réalisées tous les centimètres. L'utilisation des carottes semble ainsi être plus efficace pour ce type d'étude si l'on possède des modèles de prédiction NIRS efficaces.

## **CONCLUSIONS GENERALES**

Ce travail, traite et apporte des informations intéressantes et indispensables sur le Liquidambar de Mandraka. Il apporte aussi des outils importants pour l'amélioration des espèces forestières malgaches. Il s'est fixé comme objectif général de proposer des recommandations pour améliorer le *Liquidambar styraciflua* pour une sylviculture et une utilisation de son bois adaptées au contexte malgache. Le présent travail s'est focalisé sur l'essai de provenances de Liquidambar installé à Mandraka (Madagascar). Cette étude a été réalisée à partir des mensurations individuelles annuelles du diamètre et de la hauteur totale de l'essai de plantation à Mandraka et aussi à partir des échantillonnages de graines et d'arbres sur 9 provenances de Liquidambar. Grâce aux données dendrométriques annuelles, ce travail a pu étudier l'adaptation et la faculté de croissance de Liquidambar à Mandraka par rapport aux autres essences forestières courantes introduites à Madagascar et par rapport aux Liquidambar des autres essais internationaux de provenances dans le monde. Les protocoles d'échantillonnages nous ont permis d'étudier l'influence des provenances, de la topographie et de l'environnement extérieur sur la germination, la croissance juvénile des descendants de Liquidambar de Mandraka et des propriétés physico-mécaniques de son bois. Ce travail a contribué aussi à avancer les méthodes de caractérisation non destructives des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar.

*Liquidambar styraciflua* s'adapte bien à Mandraka en termes de croissance et même sur le versant Est de Madagascar étant donné que les autres sites d'introduction de l'espèce à Madagascar ont montré des croissances très acceptables même en l'absence de soins sylvicoles. Vis-à-vis des essences forestières introduites à Madagascar comme *Eucalyptus robusta*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Pinus patula* et *Pinus kesiya*, *Liquidambar styraciflua* montre une croissance rapide et prometteuse en terme de production de biomasse (accroissement annuel en diamètre et en hauteur : 1,5 cm/an et 1 m/an). L'hypothèse selon laquelle la croissance de *Liquidambar styraciflua* est meilleure à Madagascar (en l'occurrence à Mandraka), par rapport à d'autres espèces courantes exotiques à Madagascar et aux Liquidambar des essais internationaux de provenance dans le monde est donc confirmée. Pour ce qui est de la variabilité des caractéristiques dendrométriques ; la provenance a un effet significatif sur la valeur moyenne de la hauteur et du diamètre de Liquidambar et l'analyse de variance démontre que ces caractères sont sous fort contrôle génétique. Ainsi, on peut intégrer ces caractères dans l'amélioration génétique de l'espèce. Les provenances Buenos Aires et Finca Las Victorias semblent avoir une grande potentialité d'adaptation en croissance dans des régions comme celle de Mandraka.

En termes de production grainière, le Liquidambar de Mandraka se montre plus productif à Madagascar que dans son aire naturelle. En moyenne dans l'essai, le taux de germination de Liquidambar est élevé (83%). Pour le classement des provenances au niveau de la germination, nous retrouvons encore les mêmes provenances (Buenos Aires, Finca las Victorias), classées en tête de liste des meilleures croissances. Les arbres-mères dont la hauteur moyenne est la plus élevée (Buenos Aires, Finca Las Victorias) produisent des graines plus fertiles. Les substrats, les conditions dans chaque bloc de répétitions des arbres-mères (en l'occurrence la fertilité du sol, l'exposition au vent et au soleil), la provenance et leurs interactions sont les sources de la variabilité de la germination. Pour ce qui est de la croissance juvénile jusqu'à 425 jours après le semis, les provenances, les blocs de répétitions des arbres mères et leurs interactions sont les sources de la variabilité de la hauteur des jeunes plants. Cependant, la variabilité au niveau provenance est de plus en plus marquée par rapport à celle due aux blocs de répétitions des arbres mères quand l'âge des plants augmente. Ceci est encore étayé par la forte héritabilité de la croissance juvénile des jeunes plants de Liquidambar ( $h^2_G$  : 0,73 à 425 jours). Avec des soins en pépinière adéquats, le taux de survie des jeunes plants au bout de 425 jours est de 93%. Ainsi, l'hypothèse selon laquelle *Liquidambar styraciflua* de Mandraka a une bonne faculté de multiplication, si nous nous référons sur le taux de germination, la croissance juvénile et le taux de survie des jeunes plants, est confirmée.

Le bois de Liquidambar de Mandraka est peu durable. Les propriétés physico-mécaniques de son bois sont meilleures par rapport à celles dans son aire naturelle de distribution et par rapport au liquidambar des autres pays. Il a un fort retrait mais une bonne conduite de séchage peut le corriger offrant du bois sans déformation. Vis-à-vis du bois des Liquidambar des autres pays, les valeurs des propriétés physico-mécaniques de ceux de Mandraka, âgés de 23 et 24 ans, sont moins variables, démontrant sa forte potentialité. De plus, la plantation de Liquidambar peut produire du bois avec une révolution de 20 ans. Les bois qui en sont issus peuvent être utilisés en ameublement, placage, agencement intérieur ou en structure tout en tenant compte des risques biologiques. Dans le cas où le bois de Liquidambar serait utilisé pour la production de charbon de bois ou de bois de chauffage, la présence de rejets de souche peut permettre de gérer les futures plantations en taillis ou en taillis sous futaie. Le Liquidambar est donc non seulement une espèce prometteuse pour le reboisement villageois, mais l'utilisation potentielle de son bois peut contribuer à compléter les déficits en produits ligneux du marché local malgache

Des corrélations significatives faibles à fortes ont été observées entre les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar. De plus, ces propriétés suivent des variations linéaires ou logarithmiques de la moelle à l'écorce de l'arbre et qui méritent d'être considérés lors de l'utilisation du bois. Le bois de Liquidambar présente du bois de tension. Ainsi, lors de l'exploitation du bois de Liquidambar sur des terrains en pente ou sur des arbres inclinés, nous conseillons de prendre en compte la présence de ces types de bois lors de l'abattage et du sciage.

Vis-à-vis des méthodes non destructives de caractérisation des propriétés du bois, un nouveau pas vient d'être franchi, avec cette étude, qui est de pouvoir mesurer le module d'élasticité du bois de Liquidambar sur des petits échantillons (10 mm x 20 mm x 20 mm) avec Usan. De plus, la calibration par SPIR peut permettre de prédire le module d'élasticité, l'infradensité et le point de saturation des fibres du bois de Liquidambar. Pour des études préliminaires, les modèles de prédictions par SPIR des retraits (radial et tangentiel), de la dureté Monnin, du module de rupture en flexion et en compression du bois de Liquidambar peuvent être utilisés. Enfin, les distributions des valeurs du module d'élasticité prédit par SPIR et mesuré par le dispositif ultrasonore sur des carottes de bois de Liquidambar sont identiques. Ainsi, l'hypothèse selon laquelle la combinaison des mesures de références de laboratoire avec la méthode vibratoire BING® (Beam Identification for Nondestructive Grading), la SPIR (Spectrométrie Proche Infra Rouge), et les ultra-sons permettent de caractériser indirectement certaines propriétés physico-mécaniques du bois sans avoir recours à des mesures destructives est confirmée en partie, étant donné que tous les modèles de prédiction par SPIR ne sont pas tous suffisamment fiables selon les propriétés si nous nous référons aux valeurs du RPD,  $R^2C$ ,  $R^2cv$ , RMSEC et RMSECV.

Tout comme pour les arbres d'éclaircies, les propriétés physico-mécaniques des arbres dominants et co-dominants sont variables de la moelle à l'écorce. La provenance, les blocs de répétition, l'arbre et l'interaction bloc x provenance sont les sources de variabilité des propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar. Cependant, la provenance est le facteur le plus important de la variation inter-arbres des propriétés physico-mécaniques du bois. L'effet de ces sources de variabilité sur les propriétés physico-mécaniques du bois provenant des arbres d'éclaircie et des arbres dominants et co-dominants ne sont pas les mêmes. Les propriétés physico-mécaniques des arbres dominants sont beaucoup plus influencées par ses sources de variabilité que ceux des arbres d'éclaircie. L'estimation de l'héritabilité a révélé que les propriétés physico-mécaniques des arbres dominants sont fortement héréditaires et sous fort contrôle génétique ( $h^2_G$  0,77 à 0,99) par rapport aux

propriétés physico-mécaniques des arbres d'éclaircie ( $h^2_G$  0,28 à 0,84). Nous en déduisons alors que l'hypothèse selon laquelle les caractéristiques de croissance, la faculté de multiplication, la croissance juvénile de Liquidambar et les propriétés de son bois sont sous contrôle génétique est prouvée. Il en est de même pour l'existence des liens entre certaines propriétés du bois avec les caractéristiques de croissance et l'environnement de l'arbre. Ainsi, les propriétés physico-mécaniques du bois de Liquidambar méritent donc d'être intégrées dans les programmes d'amélioration de son bois. De plus la forte héritabilité et variabilité de ces propriétés prouvent qu'elles peuvent encore être améliorées.

A l'issue de ce travail, d'autres activités permettant une meilleure connaissance et valorisation du Liquidambar, devraient être développées à savoir : (1) le suivi phénologique de l'essai de provenances à Mandraka qui a pour principal objectif de cibler les périodes optimales de récolte de graines, (2) le suivi post pépinière des nouvelles plantations de Liquidambar pour la réussite en reboisement, (3) la réalisation des essais de descendance multisites pour une amélioration de l'espèce (croissance, bois), une meilleure estimation des valeurs de l'héritabilité et des corrélations génétiques et une sélection multicritères plus efficace. Nous nous posons aussi des questions sur la faisabilité du bouturage horticole car son succès permettrait ensuite une amélioration variétale par voie clonale. Afin d'augmenter la valeur ajoutée des plantations de Liquidambar par une valorisation bois matériaux et énergie, il serait utile d'étudier le pouvoir calorifique du bois de cette espèce.



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adedipe, O. E. & Dawson-Andoh, B. (2008) Prediction of yellow-poplar (*Liriodendron tulipifera*) veneer stiffness and bulk density using near infrared spectroscopy and multivariate calibration. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* **16**: 487-496.
- AFNOR (1985) NF B51-005 Bois, Détermination de la masse volumique, France, p. 9.
- AFNOR (1985) NFB 51-006 Bois, Détermination du retrait, France, p. 10.
- AFNOR (1985) NF B 51-007 Bois, Essai de compression axiale, France, p. 5.
- AFNOR (1987) NF B 51-008 Bois - Essai de flexion statique, Détermination de la résistance à la flexion statique de petites éprouvettes sans défaut, France, p. 6.
- AFNOR (1985) NF B51-013 Bois, Détermination de la dureté Monnin, France, p. 9.
- AFNOR (1997) NF EN 84 Produit de préservation du bois, Epreuve de vieillissement accéléré des bois traités avant essais biologiques, Epreuve de délavage, France, p. 8.
- AFNOR (2005) NF EN 117 Produit de préservation du bois, Détermination du seuil d'efficacité contre les espèces Réticulitermes (termite européens) (Méthode de laboratoire), France, p. 22.
- AFNOR (2006) XP CEN/TS 15083-1 Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois, Détermination de la durabilité naturelle du bois massif vis à vis des champignons lignivores - Méthodes d'essai, France, p. 19.
- AFNOR (2012) NF EN 408+A1 Structure en bois, Bois de structure et bois lamellé-collé, Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques, p. 35.
- American Hardwood Export Council (2008) Sustainable American Hardwood, A guide to species, p. 40.
- American Hardwood Export Council (2009) Guide illustré du classement des bois feuillus américains, National Hardwood Lumber Association, p. 24.
- Akkemik, Ü. & Yaman, B. (2012) Wood Anatomy of Eastern Mediterranean Species, Germany, Verlag Kessel Publishing House, p. 31.
- Alden, A. (1995) Hardwoods of North America: General Technical Report FPL-GTR-83, Forests Products Laboratory, United States Department of Agriculture, p. 140.
- Alfas, P., Qibin, Y., Zhang, S. Y., John, M., Pierre, P. & Jean, B. (2005) Variation in Wood Density and Shrinkage and Their Relationship to Growth of Selected Young Poplar Hybrid Crosses. *Forest Science* **51**(5): 472-482.
- Alteyrac, J. (2005) Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'épinette noire (*Picea mariana* (mill.) b.s.p.), Université Laval, Canada Québec, 154 p.

- Alves, A., Santos, A., Rozenberg, P., Pâques, L. E., Charpentier, J. P., Schwanninger, M. & Rodriguez, J. (2012) A common near infrared-based partial least squares regression model for the prediction of wood density of *Pinus pinaster* and *Larix 3 eurolepis*. *Wood Science and Technology* **46**: 157-175.
- Ambroise, C. (2007) Test d'hypothèses multiples (Cours de statistique), UMR CNRS 8071, Laboratoire Statistique et Génome, France, 28 diapositives
- Andrade, C. R., Truigilho, P. F., Napoli, A., Quinhones, R. & Lima, J. T. (2010) Calibrações NIRS para três propriedades químicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*. *Cerne Lavras* **16 Suplemento**: 9-14.
- Andrianaivo, O. A. (2009) Diversité génétique, physiologie de reproduction et étude d'impact de la fragmentation sur *Dalbergia monticola* de la forêt orientale de Madagascar, thèse de doctorat, *Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Départements des Eaux et Forêts*, Université d'Antananarivo, Madagascar, 110 p.
- Association of Official Seed Analysts (1993) Rules for testing seeds. *Journal of Seed Technology* **16**(3): 1-113.
- Apiolaza, L. A., Raymond, C. A. & Yeo, B. J. (2005) Genetic variation of physical and chemical wood properties of *Eucalyptus globulus*. *Silvae Genetica* **54**(4-5): 160-165.
- Auberlinder, V. (1984) Le Liquidambar. Afocel-Armef, p. 12.
- Baillères, H., Davrieux, F. & Ham-Pichavant, F. (2002) Near infrared analysis as a tool for rapid screening of some major wood characteristics in a eucalyptus breeding program. *Annals of Forest Science* **59**: 479-490.
- Baillères, H., Vitrac, O. & Ramanantoandro, T. (2005) Assessment of continuous distribution of wood properties from a low number of samples: Application to the variability of modulus of elasticity between trees and within a tree. *Holzforschung* **59**: 524-530.
- Baligand, B. & Gozelier, M. (1986) Analyse spectrale en contrôle non destructif par ultrasons. *Traitement du signal* **3**(1): 35-43.
- Barbosa, L. C. A., Maltha, C. R. A., Boas, L. A. V., Pinheiro, P. F. & Colodette, J. L. (2008) Profiles of extractives across the ZDHT (PO) D and DHT (PO) D bleaching sequences for a *Eucalyptus* kraft pulp. *Appita Journal* **61**(1): 64.
- Bastide, B. & Diallo, B. (1996) Comparaison de provenances de *Faidherbia albida* en plantation au Burkina-Faso. *Cahiers scientifiques* **12**: 259-268.
- Bastien, Y. & Wilhelm, G. J. (2000) Une sylviculture d'arbres pour produire des gros bois de qualité. *Revue forestière française* **52**(5): 407-424.

- Beall, F. C. (2002) Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. *Wood Science and Technology* **36**: 197-212.
- Bendtsen, B. A. (1978) Properties of wood from improved and intensively managed trees. *Forest Products Journal* **28**(10): 61-72.
- Bertrand, D. (2005) Etalonnage multidimensionnel : application aux données spectrales. Techniques de l'Ingénieur.
- Bewley, J. D. & Black, M. (1982) Physiology and biochemistry of seeds. New York: Springer Verlag.
- Biro, Y. (1972) Variabilité intraspécifique du poids de la graine chez le Douglas (Pseudotsuga menziesii Mirb. Franco). *Sylvae genetica* **21**(6): 230-243.
- Blaser, J. (1984) El parámetro tendencia del arbor. *EL Chasqui* **5**: 22-25.
- Bonner, F. (1967) Germination of sweetgum seed in response to light. *Journal of Forestry* **65**(5): 339.
- Bonner, F., Vozzo, J. A., Elam, W. W. & Land, S. B. (1994) Tree Seed technology, Training Course, New Orleans, Louisiana, United States Department of Agriculture, p. 154.
- Bonner, F. T. (1970) Artificial ripening of sweetgum seeds. *Tree Planters Notes* **21**(3): 23-25.
- Bouffier, L., Raffin, A., Rozenberg, P., Meredieu, C. & Kremer, A. (2008) What are the consequences of growth selection on wood density in the French maritime pine breeding programme? *Tree Genetics & Genomes*: 15.
- Brancheriau, L. (2011) Corrections for Poisson effect in longitudinal vibrations and shearing deformations in transverse vibrations applied to a prismatic orthotropic body, Mechanical vibrations: types, testing and analysis: New York, Nova Science Publishers, p. 205-223.
- Brancheriau, L. & Baillères, H. (2002) Natural vibration analysis of clear wooden beams: a theoretical review. *Wood Science and Technology* **36**: 347-365.
- Brancheriau, L., Baillères, H. & Guitard, D. (2002) Comparison between modulus of elasticity values calculated using 3 and 4 point bending tests on wooden samples. *Wood Science and Technology* **36**: 367-386.
- Bucur, V. (1981) Détermination du module d'Young du bois par une méthode dynamique sur carottes de sondage. *Annals of Science Forest* **38**(2): 283-298.
- Bucur, V. (1986) Mesure sur carottes de sondage de quelques propriétés physiques de bois de hêtre à forte contraintes de croissance. *Annals of Science Forest* **43**(1): 115-124.
- Burns, D. A. & Ciurczak, E. W. (2008) Handbook of Near-Infrared Analysis: Practical spectroscopy series, vol 35, p.836.

- Camacho-Cruz, A., Gonzalez-Espinosa, M., Wolf, J. H. D. & De Jong, B. H. J. (2000) Germination and survival of tree species in disturbed forests of the highlands of Chiapas, Mexico. *Canadian Journal of Botany* **78**(10): 1309-1318.
- Campbell, R. K. & Sorensen, F. C. (1978) Effect of test environment on expression of clines and on delimitation of seed zones in Douglas-fir. *Theoretical and Applied Genetics* **51**: 233-246.
- Campredon, J. (1953) Le bois de réaction. Veine rouges, cellules gélatineuse. *La revue du bois et de ses applications* **8**(2): 3-7.
- Cao, T., Valsta, L., Härkönen, S., Saranpää, P. & Mäkelä, A. (2008) Effects of thinning and fertilization on wood properties and economic returns for Norway spruce. *Forest Ecology and Management* **256**(1280-1289).
- Cappa, E. P., Pathauer, P. S. & Lopez, G. A. (2010) Provenance variation and genetic parameters of *Eucalyptus viminalis* in Argentina. *Tree Genetics and Genomes* (online version): p. 14.
- Carpenter, B. E. & Hopkins, W. C. (1966) Specific gravity values of Sweetgum topwood and bolewood. *Forest Products Journal* **16**(7): 30-30.
- Carter, P. M. & Hughes, C. E. (1984) Liquidambar styraciflua L. - a species of a potential for the tropics. *Commonwealth Forestry Review* **63**(3): 207-216.
- Chaix, G., Kokutse, A.-D., Ratovomboahangy, B., Guibal, D., Randrianjafy, H., Rakotondraoelina, H., Brancheriau, L., Rakotovololonalimanana, H., Hein, P. R. G. & Ramananantoandro, T. (2010) Prediction of radial and tangential shrinkages by near infrared spectroscopy: an example for *Tectona grandis* from Togo and for *Liquidambar styraciflua* from Madagascar. *Cerne* **16**: 66-73.
- Chaix, G. & Ramamonjisoa, L. (2001) Production de semences pour les reboisements malgaches. *Bois et Forêts des Tropiques* **268**(2): 49-64.
- Chamshama, S. A. O., Chingonikaya, E. E., Iddi, S., Mugasha, A. G., Nshubemuki, L. & Malimbwi, R. E. (1999) Survival, growth and wood density of *Pinus kesiya* provenances at Buhindi, Mwanza, Tanzania. *Journal of Tropical Forest Science* **11**(2): 401-409.
- Chang, S. X. (2003) Seedling sweetgum (*Liquidambar styraciflua* L.) half-sib family response to N and P fertilization: growth, leaf area, net photosynthesis and nutrient uptake *Forest Ecology and Management* **173**: 281-291.
- Chein, S.-C., Xiao, J.-h., Tseng, Y.-H., Kuo, Y.-H. & Wang, S.-Y. (2013) Composition and fungal activity of balsam from *Liquidambar formosana* Hance. *Holzforschung* **67**(3):

- 645-351.
- Clair, B. (2001) Etude des propriétés mécaniques et du retrait au séchage du bois à l'échelle de la paroi cellulaire: essai de compréhension du comportement macroscopique paradoxal du bois de tension à couche gélatineuse. Thèse de doctorat, *École nationale du génie rural, des eaux et des forêts*, Université de Montpellier II, France, 185 p.
- Clair, B., Gril, J., Baba, K. i., Thibaut, B. & Sugiyama, J. (2004) Precautions for the structural analysis of the gelatinous layer in tension wood. *International Association of Wood Anatomists Journal*: 8.
- Cogliastro, A., d'Orangeville, L., Lalanne, A. J. & Daigle, S. (2006) Conditions de croissance et réponses des feuillus selon différentes stratégies de régénération par la plantation, Canada, Université de Montréal, p. 110.
- Colonado, M. (1992) Liquidambar styraciflua, Fire Effects Information System. U S Department of Agriculture, Forest Service, p. 9.
- Corbineau, F., Defresne, S. & Côme, D. (1985) Quelques caractéristiques de la germination des graines et de la croissance des plantules de Cedrela odorata L. (Méliacées). *Bois et Forêts des Tropiques* **207**: 17-22.
- Cowling, E. B. (1961) Comparative Biochemistry of the decay of Sweetgum sapwood by White-Rot and Brown-Rot Fungi. University of Wisconsin Madison, p. 248.
- Craven, D., Gulamhussein, S. & Berlyn, G. P. (2010) Physiological and anatomical responses of Acacia koa (Gray) seedlings to varying light and drought conditions. *Environmental and Experimental Botany* **69**: 205-213.
- Cros, E. T. (1977) Aperçu de la transmission héréditaire de quelques caractères juvéniles chez Populus nigra L. *Annals of Forest Science* **34**(4): 311-322.
- Centre Régional de la Propriété Forestière du Limousin (2009) Principe de Croissance d'un arbre V1.0, France, Délégation régional du CNPF, p. 6.
- Décret N° 98-782 du 16 septembre 1998 relatif au régime de l'exploitation forestière. Ministère de l'Environnement, des Eaux et Forêts de Madagascar
- Defix, A. (1985) Eléments de métrologie générale et de métrologie légale. Edition Technip, p. 224.
- Département des Recherches Forestières et Piscicoles (1996) Bilan de 20 années de Recherche en génétique forestière, Cellule génétique N°721, Projet FED 6 ACP MAG 84 . FOFIFA. Madagascar, p. 55.
- Dinh, A. T. (2011) Comportement élastique linéaire et non-linéaire du bois en relation avec sa structure. Thèse de doctorat, *Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois*, Institut

- des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement: (AgroParisTech), France, 162 p.
- Dlamini, C. S. (2000) Provenance and family variation in germination and early seedling growth in *Sclerocarya birrea* sub-species *caffra*. *Journal of Horticulture and forestry* **2**(9): 229-235.
- Dlamini, C. S. (2010) Provenance and family variation in germination and early seedling growth in *Sclerocarya birrea* sub-species *caffra*. *Journal of Horticulture and Forestry* **2**(9): 229-235.
- Ducrey, M. & Huc, R. (1999) Effets de l'éclaircie sur la croissance et le fonctionnement écophysologique d'un taillis de chêne vert. *Revue forestière française* **2**: 326-340.
- Edney, M., Izydorczyk, M. S., Symons, S. & Woodbeck, N. (2003) Mesure de la couleur et de la taille du grain d'orge pour prédire la qualité d'utilisation finale du malt. *Commission canadienne des grains*: 19.
- Egli, D. B. & Zhen-wen, Y. (1991) Crop Growth Rate and Seeds per Unit Area in Soybean. *Crop science journal* **31**(2): 439-442.
- Enoch, A. D. G., Fanou, N., Kouke, A., Avohou, H., Vodouhe, R. S. & Ahanchede, A. (2006) Évaluation agronomique de trois espèces de Egusi (Cucurbitaceae) utilisées dans l'alimentation au Bénin et élaboration d'un modèle de prédiction du rendement. *Biotechnol Agron Soc Environ* **10**(2): 121-129.
- ESSA-Forêts (2012) Caractérisation du peuplement de *Liquidambar styraciflua* [Hamamelidaceae], Carl von Linné, 1973, de la station forestière de Mandraka, Rapport d'inventaire, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département des Eaux et Forêts, p. 46.
- Ezell, A. W. (1977) Variation of Selected Anatomical and Physical Properties in Sweetgum (*Liquidambar Styraciflua* L.) Grown on Upland and Bottomland Sites in Louisiana. University Microfilms.
- Fady, B. (1988) Comparaison des stratégies de croissance en hauteur du sapin de céphalonie (*Abies cephalonica* Loud.) et du cèdre de l'atlas (*Cedrus atlantica* Manetti). *Forêt méditerranéenne* **2**(X): 397-406.
- Falconer, D. S. & Mackay, T. F. C. (2004) Anecdotal, Historical and Critical Commentaries on Genetics. *Genetics* **167**: 1529-1536.
- FAO (2006) Évaluation des ressources forestières mondiales 2005, Progrès vers la gestion forestière durable, Rome, p. 351.
- FAO (2007) Situation des forêts du monde 2007, Rome, p. 157.

- FAO (2011) Situation des forêts du monde 2011, Rome, p. 193.
- FAO (2012) Situation des forêts du monde 2012, Rome, p. 66.
- Faust, T. D., Alister, R. H. M. & Zarnoch, S. J. (1990) Strength and stiffness properties of sweetgum and yellow-poplar structural lumber. *Forest Products Journal* **40**(10): 58-64.
- Fleury, E. & Chiche, M. (2006) Le bois dans la construction, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, p. 30.
- FOFIFA (1990a) Introduction d'espèces exotiques à Madagascar, Rapport de synthèse, Département de Recherches Forestières et Piscicoles, Antananarivo, Tome I, non paginé
- FOFIFA (1990b) Introduction d'espèces exotiques à Madagascar, Rapport de synthèse, Département de Recherches Forestières et Piscicoles, Antananarivo, Tome II, non paginé
- Fournier, M., Chanson, B., Thibaut, B. & Guitard, D. (1991) Mécanique de l'arbre sur pied: modélisation d'une structure en croissance soumise à des chargements permanents et évolutifs. 2. Analyse tridimensionnelle des contraintes de maturation, cas du feuillu standard. *Annales des sciences forestières* **48**(5): 527-546.
- Fowels, H. A. (1965) *Silvics of forest trees of the United States*. Washington DC: US Department of agriculture, Forest Service.
- Fujimoto, T., Kurata, Y., Matsumoto, K. & Tsuchikawa, S. (2008) Application of near infrared spectroscopy for estimating wood mechanical properties of small and full length lumber. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* **16**: 529-537.
- Fujimoto, T., Kurata, Y., Matsumoto, K. & Tsuchikawa, S. (2008) Application of near infrared spectroscopy for estimating wood mechanical properties of small clear and full length lumber specimens. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* **16**: 529-537.
- George, D. N. J., Pant, H. C. & Singh, J. (1962) Extractives in Teak. *Silvae genetica* **11**(3): 57-63.
- Gilman, E. F. & Watson, D. (1993) Liquidambar styraciflua Sweetgum. Liquidambar styraciflua Sweetgum, University of Florida, p. 4.
- Giordanengo, T., Charpentier, J.-P., Boizot, N., Roussel, S., Roger, J.-M., Chaix, G., Robin, C. & Mourey, N. (2009) Procédé de mesure rapide et non destructif des polyphénols du bois de chêne de tonnellerie. *Revue Française d'œnologie* **234**: 10-15.
- Goudiaby, V. C. A. (2011) Réponse du pin et de l'épinette noire à l'éclaircie commerciale en forêt boréale. Thèse de doctorat, *Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue*, Université du Québec, Canada, 180 p.
- Grzeskowiak, V., Sassus, F. & Fournier, M. (1996) Coloration macroscopique, retraits

- longitudinaux de maturation et de séchage du bois de tension du peuplier (*Populus x euramericana* cv I.214). *Annals of Forest Science* **53**: 1083-1097.
- Guinard, D. (2009) La filière bois en Europe et dans le monde. *Responsabilité & Environnement* **53**: 49-56.
- Guitard, D. (1987) Mécanique du matériau bois et composites: Toulouse, France, Cépaduès, 238 p.
- Guitard, D. & Amri, F. E. (1987) Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. *Annals of Science Forest* **44**(3): 335-358.
- Haines, D. W., Leban, J. M. & Herbé, C. (1996) Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. *Wood and Science Technology* **30**: 253-263.
- Hannrup, B., Cahalan, C., Chantre, G., Grabner, M., Karlsson, B., Bayon, I. L., Jones, G. L., Müller, U., Pereira, H., Rodrigues, J. C., Rosner, S., Rozenberg, P., Wilhelmsson, L. & Wimmer, R. (2004) Genetic parameters of growth and wood quality in *Picea abies*. *Scandinavian Journal of Forest Research* **19**: 14-29.
- Hein, P. R. G. (2011) Genetic and environmental control of microfibril angle on Eucalyptus wood: its effects on wood traits and implication for selection. Thèse de doctorat, *Information, Structures et Systèmes*, Université Montpellier 2, France, 168 p.
- Hein, P. R. G., Clair, B., Brancheriau, L. & Chaix, G. (2010) Predicting microfibril angle in Eucalyptus wood from different wood faces and surface qualities using near infrared spectra. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* (18): 455-464.
- Hicks, R. R. & Reines, M. (1967) The Phenology of Sweetgum *Liquidambar styraciflua* L. *Journal of the University of Georgia* **102**: 18-24.
- Hunter, A. G. & Goggans, J. F. (1968) Variation in specific gravity, diameter growth, and colored heartwood of Sweetgum in Alabama. *Tappi* **51**(2).
- ISTA (2007) International Rules for Seed Testing: Edition 2007: Adopted at the Ordinary Meeting 2006, to Become Effective on 1st. January 2007, vol 29, Glattbrugg/Zurich, Switzerland, p. 580.
- Iversen, C. M. & Norby, R. J. (2008) Nitrogen limitation in a Sweetgum plantation: implication for carbon allocation and storage. *Canadian journal for forest research* **38**: 1021-1032.
- Jacquot, C., Trenard, Y. & Dirol, D. (1973) Atlas d'anatomie des bois des Angiospermes: essence feuillues, vol 1 Centre technique du bois, Paris, p. 247.



- Jaouen, G. (2007) Etude des stratégies biomécaniques de croissance des jeunes arbres en peuplement hétérogène tropical humide. Thèse de doctorat, Université de Nancy, France, p. 217.
- Jeffries, T. M. (2008) Relationships of Growth Rate and Mechanical Properties in Sweetgum, *Liquidambar styraciflua*. Master, *Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University*, Blacksburg, Virginia, p. 107.
- Jensen, A. W. (1932) Botanical histochemistry : principles and practice: A series of books in biology: San Francisco, USA, Freeman & Co, p. 408.
- Jett, J. B. & Zobel, B. J. (1975) Wood and pulping properties of young hardwoods. *Tappi* **58**(1): 92-96.
- Johnson, G. R. & Gartner, B. L. (2006) Genetic variation in basic density and modulus of elasticity of coastal Douglas-fir. *Tree Genetics and Genomes* **3**: 25-33.
- Johnson, R. L. (1985) Sweetgum (*Liquidambar styraciflua* L.). An American wood, United States Department of Agriculture, p. 6.
- Jones, P. D., Schimleck, L. R., Peter, G. F., Daniels, R. F. & Clark, A. (2006) Nondestructive estimation of wood chemical composition of sections of radial wood strips by diffuse reflectance near infrared spectroscopy. *Wood and Science Technology* **40**: 709-720.
- Jouan-Rimbaud, D., Bouveresse, E., Massart, D. L. & Noord, O. E. d. (1999) Detection of prediction outliers and inliers in multivariate calibration. *Analytica Chimica Acta* **388**: 283-301.
- Jourez, B. (1997) Le bois de tension. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **1**(7): 100-112.
- Kelley, S. S., Rials, T. G., Snell, R., Groom, L. H. & Sluiter, A. (2004) Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. *Wood and Science Technology* **38**: 257-276.
- Khan, M. L. (2004) Effects of seed mass on seedling success in *Artocarpus heterophyllus* a tropical tree species of north-east India. *International Journal of Ecology* **25**: 103-110.
- Knapic, S., Louzada, J. L., Leal, S. & Pereira, H. (2007) Radial variation of wood density components and ring width in cork oak trees. *Annals of Forest Science* **64**: 211-218.
- Kokutse, A. D., Baillères, H. & Kokou, K. (2004) Proportion and quality of heartwood in Togolese teak (*Tectona grandis* L.f.). *Forest Ecology and Management* **189**: 37-48.
- Kollman, F. & Côté, W. (1984) Principles of wood science and technology: Solid Wood, vol 1, Berlin, Springer Verlag, p. 592.
- Kormanik, P. P. (1990) *Liquidambar styraciflua* L., sweetgum. Silvics of North America: Hardwoods agricultural Handbook, vol. 654, Department of agriculture, Forest Service,

- Washington, DC, p. 400-405.
- Kothiyal, V. & Raturi, A. (2011) Estimating mechanical properties and specific gravity for five-year-old *Eucalyptus tereticornis* having broad moisture content range by NIR spectroscopy. *Holzforschung* **65**.
- Kremer, A. (1986) Les variations d'expression du génotype (corrélation juvénile-adulte et interaction génotype x milieu). Approche quantitative et explicative. *Revue forestière française* **38**: 40-47.
- Lacharme, M. (2001) "Fascicule 10" La production de semences certifiées, Règles à suivre à l'exploitation, France, Ministère du Développement Rural et de l'Environnement, Direction de la Recherche Formation Vulgarisation, p. 17.
- Lamhamedi, M. S., Youssef, A., Bertrand, F., André, F. J. & Hank, M. (2000) Problématique des pépinières forestières en Afrique du Nord et stratégies de développement. *Cahiers Agricultures* **9**(5): 369-380.
- Lamontagne, J. & Brazeau, D. (1996) Entretien et taille des jeunes arbres au Québec, Saint-Laurent, Canada, p. 207.
- Lasserre, J.-P., Mason, E. G., Watt, M. S. & Moore, J. R. (2009) Influence of initial planting spacing and genotype on microfibril angle, wood density, fibre properties and modulus of elasticity in *Pinus radiata* D. Don corewood. *Forest Ecology and Management* **258**: 1924-1931.
- Lauridsen, E. B. & Kjaer, E. D. (2002) Provenance research in *Gmelina arborea* Linn., Roxb. A summary of results from three decades of research and a discussion of how to use them. *International Forestry Review* **4**(1): 1-15.
- Lima, J. T., Breese, M. C. & Cahalan, C. M. (2000) Genotype-environment interaction in wood basic density of *Eucalyptus* clones. *Wood and Science Technology* **34**: 197-206.
- Lin, C.-J., Tsai, M.-J., Lee, C.-J., Wang, S.-Y. & Lin, L.-D. (2007) Effects of ring characteristics on the compressive strength and dynamic modulus of elasticity of seven softwood species. *Holzforschung* **61**: 414-418.
- Lippert, M., Courtois, C. & Poorterman, M. (2000) Evaluation non destructive des matériaux à l'aide des Ultrasons, Laboratoire des matériaux et procédés, Unité Propre de Recherche Enseignement Supérieur EA2443, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, France, p. 13.
- Love, A. E. H. (1892) *A treatise on the mathematical theory of elasticity*. (edition of 1994) Cambridge University Press.
- Lukmandaru, G. & Takahashi, K. (2008) Variation in the natural termite resistance of teak

- (*Tectona grandis* Linn. fil.) wood as a function of tree age. *Ann. Sci. Forest* **65**: online version.
- Maeglin, R. R. (1987) Juvenile wood, tension wood, and growth stress effects on processing hardwoods. Applying the latest research to hardwood problems: Hardwood symposium of the Hardwood Research, Memphis, p. 9.
- Mahmood, K., Marcar, N. E., Naqvi, M. H., Arnold, R. J., Iqbal, D. F. C. S. & Aken, K. M. (2002) Genetic variation in *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. for growth and stem straightness in a provenance-family trial on saltland in Pakistan. *Forest and Ecology Management* **176**: 405-416.
- Mattos, P. P. d., Pereira, J. C. D., Schaitza, A. G. & Carvalho, P. E. R. (2001) Características de madeira de *Liquidambar styraciflua*. *Circular Técnica* **49**: 1-4.
- Mayer, A. M. & Poljakoff-Mayber, A. (1989) The germination of seeds, vol. 4, Pergamon press, p. 265.
- Meder, B. R., Gallagher, S., Mackie, K. L., Böhler, H. & Meglen, R. R. (1999) Rapid Determination of the Chemical Composition and Density of *Pinus radiata* by PLS Modelling of Transmission and Diffuse Reflectance FTIR Spectra. *Holzforschung* **53**: 261-266.
- Ministère de l'Environnement et de Forêts (2012) Rapport sur l'Etat de l'Environnement à Madagascar 2007-2012. p.505.
- Mendizabal-Hernandez, L. D. C., Ramirez, J. M., Alba-Landa, J., Ramirez-Garcia, E. O. & Ramirez-Garcia, H. (2009) Alternativas de uso de una prueba genética de *Liquidambar styraciflua* L. *Foresta Veracruzana* **11**(2): 22-32.
- Meyers, D., Ramamonjisoa, B., Sève, J., Razafindramanga, M. & Burren, C. (2006) Étude sur la consommation et la production en produits forestiers ligneux à Madagascar, Rapport de Projet d'appui à la gestion durable de l'environnement et des écosystèmes forestiers à Madagascar (Jariala, Minenvef, IRG, N° 687-C-00-04-00155-00), Madagascar, IRG, p. 101.
- Meyers, D., Ramamonjisoa, B., Sève, J., Razafindramanga, M. & Burren, C. (2009) Étude sur la production et la consommation en produits forestiers ligneux à Madagascar, Version actualisée, Rapport de Projet d'appui à la gestion durable de l'environnement et des écosystèmes forestiers à Madagascar (Jariala, Minenvef, IRG, N° 687-C-00-04-00155-00), Madagascar, IRG, p. 98.
- Miranda, I., Almeida, M. H. & Pereira, H. (2001) Provenance and site variation of wood density in *Eucalyptus globulus* Labill. at harvest age and its relation to a non-destructive

- early assesment. *Forest and Ecology Management* **149**: 235-240.
- Miranda, I. & Pereira, H. (2002) Variation of pulpwood quality with provenances and site in *Eucalyptus globulus*. *Annals of Forest Science* **59**: 283-291.
- Montes, C. S., Hernandez, R. E., Beaulieu, J. & Weber, J. C. (2006) Genetic Variation and Correlations between Growth and Wood Density of *Calycophyllum spruceanum* at an Early Age in the Peruvian Amazon. *Silvae Genetica* **55**(4-5): 217-228.
- Montes, S. C., Vidaurre, H. V. & Weber, J. C. (2003) Variation in stem-growth and branch-wood traits among provenances of *Calycophyllum spruceanum* Benth. from the Peruvian Amazon. *New Forests* **26**: 1-16.
- Moore, J. E. & Lacey, E. P. (2009) A Comparison of Germination and Early Growth of Four Early Successional Tree Species of the Southeastern United States in different Soil and Water Regimes. *American Midland Naturalist Journal* **162**: 391-397.
- Mora, C. R. & Schimlack, L. R. (2008) on the selection of samples for multivariate regression analysis: application to near-infrared (NIR) calibration models for the prediction of pulp yield in *Eucalyptus nitens*. *Canadian Journal of Forest Resource* **38**: 2626-2634.
- Morgenstern, E. K. (1996) Geographic variation in forest trees – genetic basis and application of knowledge in silviculture: Vancouver, Canada., University of British Columbia Press, 176 p.
- Mouchiroud, D. (2003) Mathématique: outils pour la biologie, chapitre 9 Analyse de variance: France, Université Claude Bernard Lyon 1, p. 11.
- Naes, T., Isaksson, T., Fearn, T. & Davies, T. (2004) A User-friendly guide to Multivariate calibration and classification: UK, NIR Publications, p. 344.
- Namkoong, G., Kang, H.-C. & Brouard, J. S. (1988) Tree breeding: principles and strategies: Monographs on Theoretical and Applied Genetics, vol 11, Springer-Verlag, 188 p.
- Nanson, A. (1970) L'héritabilité et le gain d'origine génétique dans quelques types d'expériences. *Sylvae genetica* **19**(4): 113-121.
- Narayanamurti, B. D., George, J., Pant, H. C. & Singh, J. (1962) Extractives in Teak. *Silvae Genetica* **11**(3): 57-63.
- Nepveu, G. & Birot, Y. (1979) Les corrélations phénotypiques juvénile-adulte pour la densité du bois et la vigueur chez l'Epicéa. *Ann. Sci. Forest* **36**(2): 125-149.
- Ngantsoue, L., Essamambo, A. F., V, K. & Engangoye, B. (2005) Germination des graines et croissance des jeunes plants de *Grewia coriacea* Mast. *Ann. Univ. M. Ngouabi* **6**(1): 140-148.
- Ohta, S., Keller, R. & Janin, G. (1983) Effets de divers modes de fertilisation (N, P, K) sur

- certaines caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques et propriétés papetières du pin maritime des Landes (*Pinus pinaster* Ait.). *Annals of Science Forest* **40**(3): 283-298.
- Ona, T., Snonoda, T., Ito, K. & Shibata, M. (1998) Relations between various extracted basic densities and wood chemical components in *Eucalyptus globulus* *Journal of Wood Science* **44**: 165-168.
- Orwa, C., Mutua, A., Kindt, R., Jamnadass, R. & Anthonny, S. (2009) Agroforestree Database: a tree reference and selection guide, version 4.0.
- Osorio, L. F. (2004) Provenance results of *Gmelina arborea* in southwest Colombia at three years of age. *New Forest* **28**: 179-185.
- Osorio, L. F. & Huber, T. L. W. D. A. (2000) Age Trends of Heritabilities and Genotype-by-Environment Interactions for Growth Traits and Wood Density from Clonal Trials of *Eucalyptus grandis* HILL (ex MAIDEN). *Silvae Genetica* **50**(1): 30-37.
- Pamela, K., Tauer & Tauer, C. G. (2011) Seed maturation, flower receptivity and selfing in Sweetgum (*Liquidambar styraciflua* L.). *Tree Planter's note* **54**(01): 18-23.
- Pereira, A. B., Marques, J., Ramalho, O. G. & Althoff, M. A. P. (1997) Efficiency of early selection in half-sib families of *Eucalyptus camaldulensis* Denhn. in the north-west region of the State of Minas Geras, Brazil. *Cerne* **3**: 67-73.
- Perrin, J. R. & Ferrand, J. C. (1984) Automatisation des mesures sur carottes de sondage de la densité du bois, de son retrait et des contraintes de croissance. *Annals of Science Forest* **41**(1): 69-86.
- Plassat, F. o. (2001) Mise en œuvre du bois, Vol 7. Techniques de l'Ingénieur, p. 304.
- Poke, F. S., Potts, B. M., Vaillancourt, R. E. & Raymond, C. A. (2006) Genetic parameters for lignin, extractives and decay in *Eucalyptus globulus*. *Annals of Forest Science* **63**: 813-821.
- Polge, H. & Illy, G. (1968) Héritabilité de la densité du bois et corrélations avec la croissance étudiées à l'aide de tests non destructifs sur plants de Pins maritimes de quatre ans. *Silvae Genetica* **17**(5-6): 173-181.
- Pot, D., Chantre, G., Rozenberg, P., Rodrigues, J. C., Jones, G. L., Pereira, H., Hannrup, B. r., Cahalan, C. & Plomion, C. (2002) Genetic control of pulp and timber properties in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Annals of Forest Science* **59**(5-6): 563-575.
- Rabotovao, A. S. (2004) Mise au point de protocoles expérimentaux pour la germination et la régénération "in vitro" de *Kalanchoe synsepala* (BAKER). Mémoire de DEA, *Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département des Eaux et Forêts*, Université d'Antananarivo, Madagascar, 101 p.

- Rakotondraaelina, H. A. & Rakotovao, G. (2005) Le « Copalme d'Amérique », une belle espèce feuillue à croissance rapide pour la production de bois d'œuvre, FOFIFA/DRFP Ambatobe, Madagascar, p. 4.
- Rakotovololonalimanana, H., Ramananantoandro, T., Ratovomboahangy, B., Rakotondraaelina, H., Randrianjafy, H., Nourissier-Mountou, S., Ramamonjisoa, L., Guibal, D., Thévenon, M. F. & Chaix, G. (2011) Contrôle génétique des propriétés physico-mécaniques du bois et de la croissance du *Liquidambar styraciflua* de la Mandraka, Atelier régional sur la capitalisation des acquis
- Ramamonjisoa, L. (1993) Causes principales du pouvoir germinatif déficient des graines forestières : essai d'identification au SNGF, Madagascar, Silo National des Graines Forestières (SNGF), p. 14.
- Ramamonjisoa, L., Andrianarivo, C., Rabevohitra, R., Rakotaniaina, N., Rakotovao, Z., Rakouth, B., Ramamonjisoa, B. S., Rapanarivo, S. & Ramonta, I. R. (2003) Situation des ressources génétiques forestières de Madagascar. Note Thématique sur les Ressources Génétiques Forestières. Document de travail FGR/54F. Service de la mise en valeur des ressources forestières, Division des ressources forestières, Madagascar, p. 41
- Randrianjafy H., (1993). Production et aménagement des taillis d'eucalyptus à courte rotation : le cas des peuplements d'*E. robusta* Smith, à vocation de bois d'énergie, sur les hautes terres centrales de Madagascar. Cahiers des Sciences Forestières et de Sylviculture, EPFZ, p. 263.
- Rayleigh, J. W. S. & Lindsay, R. B. (1877) The theory of sound. (edition of 1945) Dover publications (New York).
- Raymond, C. A. (2002) Genetics of Eucalyptus wood properties. *Annals of Forest Science* **59**(5-6): 525-531.
- R Development Core Team 2012. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>
- Roman, A. R. J., hernandéz, J. J. V., Martinez, A. V., Mata, J. J. & Ortega, E. (1996) Variación geográfica y genética en el crecimiento y producción de biomasa del cocoite (*Gliricidia sepium*) en dos condiciones de humedad de suelo. *Agrociencia* **30**: 549-558.
- Rondeux, J. (1993) La mesure des arbres et des peuplements forestiers, Les presses agronomiques de Gembloux, 522 p.
- Rudman, P. (1970) The Influence of genotype and environment on wood properties of juvenile *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. *Sylvae genetica* **19**(2-3): 49-54.

- Rudman, P., Costa, E. W. B. D., Gay, F. J. & Wetherly, A. H. (1958) Relationship of Tectoquinone to Durability in *Tectona grandis*. *Nature* **18**: 721-722.
- Ruelle, J. (2006) Analyse de la diversité du bois de tension de 3 espèces d'angiospermes de forêt tropicale humide de Guyane Française. Thèse de doctorat, *UMR ECOFOG*, Université des Antilles et de la Guyane, Guyane, 291 p.
- Sabistina, B. (2010) Gum : après les paysagistes, il séduit les industriels. *Le bois international* **8**: 15-16
- Sacré, E. (1959) Le bois de tension des peupliers euraméricains d'origine belge et étrangère. *Rev. Agric.* **4**: 531-534.
- Sandoz, J. L., Benoit, Y. & Demay, L. (2000) Wood testing using acousto-ultrasonic: 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, p. 97-104.
- Sandoz, J.-L. & Benoit, Y. (2006) Acousto-Ultrasonic non-destructive evaluation of historical wooden structures, p. 8.
- Saporta, G. (2006) Probabilité Analyse des données et statistique: France, 619 p.
- Savitzky, A. & Golay, M. J. E. (1964) Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry* **36**(8): 1627-1639.
- Schimleck, L. L., Mora, C. & Daniels, R. F. (2003) Estimation of the physical wood properties of green *Pinus taeda* radial samples by near infrared spectroscopy. *Canadian Journal of Forest Research* **33**(12): 2297-2305.
- Schimleck, L. R., Evans, R. & Ilic, J. (2001) Estimation of *Eucalyptus delegatensis* wood properties by near infrared spectroscopy. *Canadian Journal of Forest Research* **31**: 1671-1675.
- Sebben, A. M., Arantes, F., Boas, O. V. & Freitas, M. L. M. (2007) Performance of 19-year-old provenances of *Liquidambar styraciflua* in Paraguaçu Paulista, São Paulo. *Crop Breeding and Applied Biotechnology* **7**: 381-386.
- Shimizu, J. Y. & Spir, I. H. Z. (1999) Avaliação de procedências e progênies de *Liquidambar* da América central, do México e dos Estados Unidos, em Agudos, Brasil. *Boletim de Pesquisa Florestal* **39**: 93-108.
- Shimizu, J. Y. & Spir, I. H. Z. (2002) Produtividade de madeira de *Liquidambar* de diferentes procedências em Quedas do Iguaçu, Parana. *Boletim de Pesquisa Florestal* **4**: 3-12.
- Shimleck, L. R. & Evans, R. (2004) Estimation of *Pinus radiata* D. Don tracheid morphological characteristics by near infrared spectroscopy. *Holzforschung* **58**: 66-73.
- Shupe, T. F., Choong, E. T. & Gibson, M. D. (1995) Shrinkage of outerwood, middlewood, and corewood of two Sweetgum trees *Wood and Fiber Science* **27**(4): 384-388.

- Sjöström, E. (1993) Wood chemistry: fundamentals and applications: USA, Access Online via Elsevier, p. 301.
- Smith, L. I. (2002) A tutorial on principal components analysis. *Cornell University, USA* **51**: 52.
- Sophie (2010) Le n'oeil de sophie, un regard curieux sur la nature. URL <http://noeilsophie.blogspot.fr/2010/05/fleurs-de-liquidambar.html>.
- Steffan-Dewenter, I. & Tschardtke, T. (1999) Effects of habitat isolation on pollinator communities and seed set. *Oecologia* **121**: 432-440.
- Steiner, K. C., Bongarten, B. & Rousseau, R. J. (1985) Juvenile growth performance in a provenance test of sweetgum: Proceedings 18th Southern Forest Tree Improvement Conference. Long Beach, MS, p. 248-257.
- Steinmetz, G. (1986) Le choix des provenances et le classement des peuplements porte-graines. *Revue Forestière Française* **38**: 69-73.
- Sykes, R., Li, B., Isik, F., Kadla, J. & Chang, H. M. (2006) Genetic variation and genotype by environment interactions of juvenile wood chemical properties in *Pinus taeda* L. *Annals of Forest Science* **63**: 897-904.
- Teixeira, D. E. & Moslemi, A. (2001) Assessing modulus of elasticity of wood-fiber cement (WFC) sheets using non destructive evaluation (NDE). *Bioresource Technology* **79**: 193-198.
- Terzi, E., Kartal, S. N., Ibanez, C. M., ^öse, C., Arango, R., Clausen, C. A. & III, F. G. (2012) Biological performance of *Liquidambar orientalis* Mill. Heartwood. *International Biodeterioration & Biodegradation* **75**: 104-108.
- Tolley, L. C. & Strain, B. R. (1984) Effects of CO<sub>2</sub> enrichment on growth of *Liquidambar styraciflua* and *Pinus taeda* seedlings under different irradiance levels. *Canadian Journal of Forest Research* **14**(3): 343-350.
- Trouy-Triboulot, M.-C. & Triboulot, P. (2001) Matériau bois - Structure et caractéristiques: C 925, Sciences et ingénierie du bois: Techniques de l'Ingénieur, France, p. 26.
- USDA (1987) Wood handbook: wood as an engineering material, vol 72, United States Department of Agriculture, 472 p.
- Via, B. K., Shupe, T. F., Groom, L. H., Stine, M. & So, C.-L. (2003) Multivariate modeling of density, strength and stiffness from near infrared spectra for mature, juvenile and pith wood of longleaf pine (*Pinus palustris*). *Near Infrared Spectroscopy* **11**: 365-378.
- Vincent, M. (2010) Impact des éclaircies sur la croissance et la qualité de l'épinette noire (*Picea Mariana* (Mill.) bsp) en forêt boréale. Thèse de doctorat, *Université du Québec à*



- Chicoutimi*, Canada, p. 200.
- Waghorn, M. J., Mason, E. G. & Watt, M. S. (2007) Influence of initial stand density and genotype on longitudinal variation in modulus of elasticity for 17-year-old *Pinus radiata*. *Forest Ecology and Management* **252**: 67-72.
- Webb, C. D. (1964) Natural variation in specific gravity, fiber length, and interlocked grain in the wood of weetgum (*Liquidambar styraciflua* L.), University of North Carolina, Raleigh, p. 138.
- Weber, J. C. & Montes, S. C. (2005) Variation and correlations among stem growth and wood traits of *Calycophyllum spruceanum* Benth. from the Peruvian Amazon. *Silvae Genetica* **54**: 31-41.
- Weber, J. C. & Montes, C. S. (2010) Correlations and clines in tree growth and wood density of *Balanites aegyptiaca* (L.) Delile provenances in Niger. *New Forests* **39**: 39-49.
- Wei, X. & Borralho, N. M. G. (1997) Genetic control of wood basic density and bark thickness and their relationships with growth traits of *Eucalyptus urophylla* in south east China. *Silvae Genetica* **46**(4): 245-249.
- Weinert, I. A. G., Wyk, P. V. & Holtzhausen, L. (1990) Fruits of tropical and subtropical origin: composition, properties and uses. *Florida Science* **3**(2): 88-115.
- White, T. L., Adams, W. T. & Neale, D. B. (2007) Forest Genetics: Washington DC, Centre for Agriculture and Biosciences International Publishing, p. 702.
- Wicker, M. (1979) Le bois de tension: acquisition récentes. *Ann. Biol* **18**(5-6): 222-254.
- Wienmann, M. C. & Williamson, G. B. (1987) Extreme changes in wood specific gravity in some tropical pionniers. *Wood and Fiber Science* **20**(3): 344-349.
- Wold, S., Sjöström, M. & Erksso, L. (2001) PLS-regression: a basic tool of chemometrics. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* **58**: 109-130.
- Wright, J. & Cunningham, M. (2008) Sweetgum plantations for sawntimber, energy, pulp, and other uses, Southern Hardwood & Pine: Georgia, p. 26-28.
- Yang, J.-L., Fife, D., Ilic, J. & Blackwell, P. (2002) Between-site and between-provenance differences in shrinkage properties of 10-year-old *Eucalyptus globulus* Labill. *Australian Forestry* **65**(4): 220-226.
- Zamudio, F., Baettyg, R., Vergara, A., Guerra, F. & Rozenberg, P. (2002) Genetic trends in wood density and radial growth with cambial age in a radiata pine progeny test. *Annals of Forest Science* **59**: 541-549.
- Zhang, S. Y. (1995) Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties individual species from distinct wood categories. *Wood and Science*

*technology* **29**: 451-465.

Zhang, S. Y., Simpson, D. & Morgenstern, E. K. (2007) Variation in the Relationship of Wood Density With Growth In 40 Black Spruce (*Picea Mariana*) Families Grown in New Brunswick. *Wood and Fiber Science* **28**(1): 91-99.

Zobel, B. J. & Buijtenen, J. P. v. (1989) *Wood variation: its causes and control*. Springer-Verlag.

Zobel, B. J., Webb, C. & Henson, F. (1959) Core or juvenile wood of loblolly and slash pine trees. *Tappi* **42**(5): 345-355.

## LISTE DES PUBLICATIONS

### ➤ *Publiés*

Chaix G, Kokutse A D, Ratovomboahangy B, Guibal D, Randrianjafy H, Rakotondraaelina H, Brancheriau L, **Rakotovololonalimanana H**, Hein P R G, Ramananantoandro T, 2010, “Prediction of radial and tangential shrinkages by near-infrared spectroscopy: example for two tropical species *Tectona grandis* from Togo and *Liquidambar styraciflua* from Madagascar”. *Cerne, Lavras* (**16**), suplemento, 66-73pp.

### ➤ *Soumis à publication*

**Rakotovololonalimanana H**, Rakotondraaelina H, Chaix G, Ramamonjisoa L, Thévennon MF, Randrianjafy H, Ramananantoandro T, « Adaptation et variabilité génétique de la croissance de *Liquidambar styraciflua* L. du verger de Mandraka (Madagascar) », Bois et Forêts des Tropiques

### ➤ *Communications avec actes complets*

**Rakotovololonalimanana H**, Chaix G, Brancheriau L, Ramamonjisoa L, Ramananantoandro T, Thévennon MF, 2013, (acceptée) “Prediction of the modulus of elasticity by Near Infra-Red Spectroscopy (NIRS) and direct measurement by ultrasonic device from cores of Liquidambar (*Liquidambar styraciflua* (L.) from Madagascar”, Présentation orale acceptée pour la « Conférence Internationale IUFRO MeMoWood : Méthodes de mesures et approches de modélisation pour prédire les futures propriétés du bois » à Nancy le 01 au 04 Octobre 2013.

**Rakotovololonalimanana H.**, Ramananantoandro T., Ratovomboahangy B., Rakotondraaelina H., Randrianjafy H., Nourissier-Mountou S., Ramamonjisoa L., Guibal D., Thévenon M F., Chaix G. « Contrôle génétique des propriétés physico-mécaniques du bois et de la croissance du *Liquidambar styraciflua* de la Mandraka », Atelier régional sur la capitalisation des acquis (SNGF), *Physiologie et Biologie*, 19 Octobre 2011, Antananarivo, Madagascar.

➤ *Posters*

**Rakotovololonalimanana H.**, Thévennon MF, Ramamonjisoa L, Ramananantoandro T Loïc Brancheriau, Chaix G, « Caractérisation et prédiction du module d'élasticité (e) du bois de *Liquidambar styraciflua* par Spectrométrie Proche Infra-Rouge (SPIR) et par mesure ultrasonore a partir de carottes de bois », poster, DOCTISS 2013

**Rakotovololonalimanana H.** Thévennon MF., Ramamonjisoa L. 2012, « Caractéristiques et corrélation entre les propriétés physico-mécaniques du bois de *Liquidambar styraciflua* de Mandraka », Poster, DOCTISS 2012

Ramananantoandro T., **Rakotovololonalimanana H.**, Norissier-Mountou S., Rakotondraaelina H., Chaix G. "Genetic Variation In Density And Mechanical Properties Of 23-year-old *Liquidambar styraciflua* From Madagascar". 54th International Convention of the Society of Wood Science and Technology, 22 juin 2011. Portland, Oregon, USA

## **ANNEXES**

## LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : HISTORIQUE DE L'INTRODUCTION DE <i>LIQUIDAMBAR STYRACIFLUA</i> A MANDRAKA	2
ANNEXE 2 : DESCRIPTION DE LA ZONE DE MANDRAKA	4
ANNEXE 3 : SCRIPT R POUR LES TRAITEMENTS STATISTIQUES DES DONNEES	8
ANNEXE 4 : PROPRIETES PHYSICO-MECANQUES DES ARBRES D'ECLAIRCIES	10
ANNEXE 5 : PROPRIETES PHYSICO-MECANQUES DES ARBRES DOMINANTS ET CO-DOMINANTS	12
ANNEXE 6 : CLASSEMENT DES PROVENANCES, DES BLOCS ET DES SUBSTRATS SELON LES CARACTERES DE MULTIPLICATION, DE CROISSANCE ET DES PROPRIETES PHYSICO-MECANQUES DU BOIS DE LIQUIDAMBAR	17
ANNEXE 7 : PARAMETRE DES MODELES DE REGRESSION DE LA MESURE DU MODULE D'ELASTICITE	25

---

**ANNEXE 1 : HISTORIQUE DE L'INTRODUCTION DE *LIQUIDAMBAR STYRACIFLUA* A MANDRAKA**

*Liquidambar styraciflua* a été planté pour la première fois à Madagascar en 1948, dans la station forestière d'Angavokely FOFIFA (1990a). En 1989, les résultats d'inventaire ont montré que l'espèce n'a pas pu survivre aux conditions du milieu FOFIFA (1990a). Plusieurs explications ont été avancées comme l'échec dès la plantation ou les aléas climatiques (coup de vent, cyclone, ...). Cette dernière hypothèse est la plus probable. Cet endroit étant très exposé au vent et fréquemment frappé par des cyclones. L'espèce fût ensuite introduite dans un arboretum de la station forestière de Manjakatampo en 1951 FOFIFA (1990b) ; (Carte 3). L'espèce a montré un comportement intéressant malgré les conditions pédologiques assez particulières du milieu. En effet, le sol a une teneur en éléments échangeables faible ( $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $K^{+}$  et  $Na^{+}$ ) à cause de la basse température du milieu entraînant un ralentissement des activités des agents de dégradation des matières organiques ; ce ralentissement se traduisant par une durée plus longue du cycle des éléments échangeables. De plus, un taux faible de  $Ca^{2+}$  entraîne aussi une inhibition de la minéralisation des éléments minéraux comme le phosphore, l'azote et le potassium, importants pour le bon développement de l'espèce. Durant l'inventaire de 1989 (38 ans après la plantation), la densité du peuplement était environ 912 tiges/ha, les plants étaient vigoureux et les fûts droits. Toutefois, l'insertion des branches avait tendance à être verticale avec de grosses branches, étant donné l'écartement considérable entre chaque pied (3m x 3m en moyenne) et faute de traitement sylvicole. A 38 ans, le Liquidambar planté à Manjakatampo a une hauteur moyenne et un diamètre moyen de 21 m et de 25 cm respectivement.

En 1968, l'espèce a été plantée dans un petit jardin public à Antsirabe à des fins récréatives. Pour ce dernier, la superficie et le nombre de pieds n'ont pas été mentionnés dans l'inventaire. L'espèce avait une croissance rapide avec des fûts droits car elle avait reçu une attention particulière (apport d'engrais, entretien sylvicole, élagage).

En 1986, l'espèce a été plantée à Mandraka dans la station d'essai du département des Eaux et Forêts de l'Ecole Supérieur des Sciences Agronomiques dans deux parcelles de l'arboretum dont l'une se trouve sur le bas versant (A 37), exposition à l'est, et, l'autre à moyen versant (A 21) exposition à l'ouest FOFIFA (1990a). Au début, 174 pieds étaient plantés (environ 2000 tiges/ha) sur la parcelle A 37 (8,5 ares), sur l'autre parcelle A 21 (8 ares), le nombre de plants à la plantation était de 182 pieds (soit 2275 tiges/ha). A 3 ans, il restait 154 pieds (soit 1800 tiges/ha) sur la parcelle A 37 et 156 pieds (2000 tiges/ha) sur l'autre parcelle. Les causes de la disparition des autres pieds n'ont pas été mentionnées dans

l'inventaire mais il se pourrait qu'ils aient été victimes d'une coupe illicite ou morts à causes des passages de cyclones. L'inventaire de 1990 sur ces deux parcelles n'a mentionné que le nombre de pieds restant. En 1987, *Liquidambar styraciflua* était introduit dans l'arboretum de la direction des Eaux et Forêts à Ambatobe FOFIFA (1990a). En 1999, 2 ans après la plantation, les résultats d'inventaire ont mentionné que la plantation de *Liquidambar* était dépérissante. Le tableau I résume l'historique des plantations de cette espèce à Madagascar depuis son introduction jusqu'à nos jours.

En 2011 (60 ans après la plantation), à Manjakatampo, les arbres sont en bonne santé et vigoureux et présentent le même défaut de branchaison cité précédemment. La hauteur et le diamètre moyens sont 25 m et 40 à 45 cm respectivement. En 2012 (26 ans après la plantation), les données de l'ESSA-Forêts ont pu montrer que la parcelle A37 comptait 125 pieds (soit 1500 tiges/ha : avec 89 pieds d'arbres adultes et 36 pieds de rejets de souches ou de sauvageons) d'une hauteur moyenne et un diamètre moyen, pour les adultes, de 24,3 m et 26 cm respectivement. L'autre parcelle, A 21, comptait, à cette même période, 171 pieds (soit environ 2140 tiges/ha : avec 115 pieds d'arbres adultes et 56 de rejets de souches ou de sauvageons) avec une hauteur moyenne et un diamètre moyen, pour les adultes, de 21,3 m et 25,8 cm respectivement. En 2012 (25 ans après la plantation), dans l'arboretum d'Ambatobe, il ne restait plus que deux pieds avec une hauteur moyenne et un diamètre moyen de 19 m et de 38 cm respectivement.

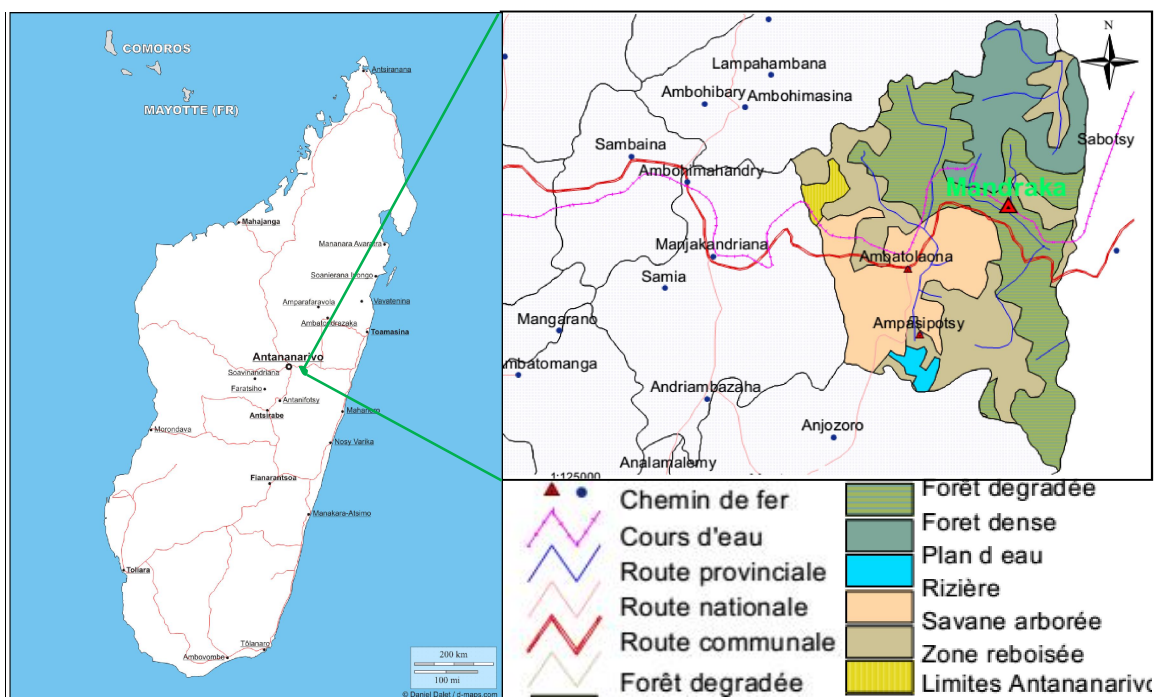


## ANNEXE 2 : DESCRIPTION DE LA ZONE DE MANDRAKA

### Situation géographique

La zone de Mandraka est localisée à entre les points 18°54' à 18°55' de latitude Sud et à 47°55' à 47°56' de longitude Est, à une altitude moyenne de 1200m. Elle se situe à l'Est d'Antananarivo sur la route nationale n°2 entre les points kilométriques 65 et 70. Sur le plan administratif, le village de Mandraka appartient à la région d'Analamanga, du district de Manjakandriana, de la commune d'Ambatolaona et du Fokontany (ensemble de quartier) de Mandraka (Carte 1).

Carte 1 : Localisation de la zone de Mandraka



### Pluviométrie et température

La précipitation moyenne annuelle enregistrée est de l'ordre de 2300 mm répartie sur 147 jours. Les mois les plus arrosés s'étalent de décembre à mars avec un maximum de 387 mm en janvier (Rajoelison et *al*, 2007) (Figure 1, Figure 2).

La température moyenne annuelle est de 17,5°C oscillant entre 13°C pour le mois le plus froid à 26°C pour le mois le plus chaud. Les mois les plus chauds de l'année sont les plus arrosés (Rajoelison et *al*, 2007) (Figure 2).



Figure 1 : Variation de la quantité de pluie de 1992 à 2008

(Source : JIRAMA à Mandraka)

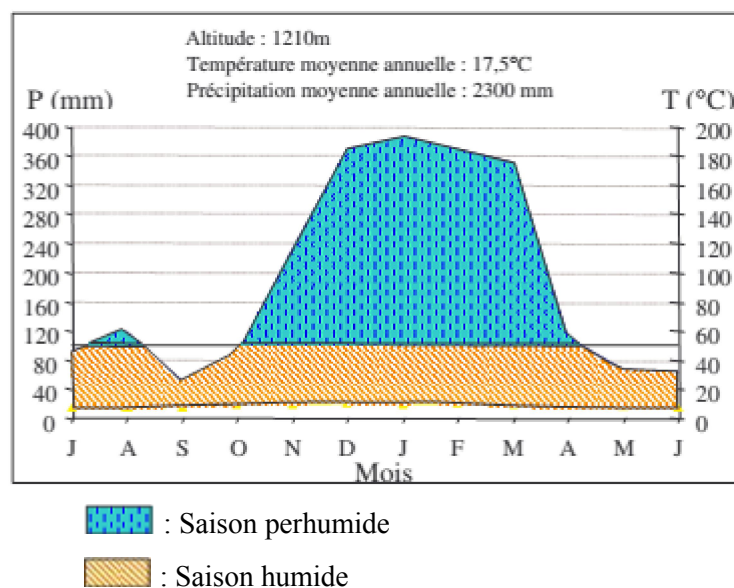
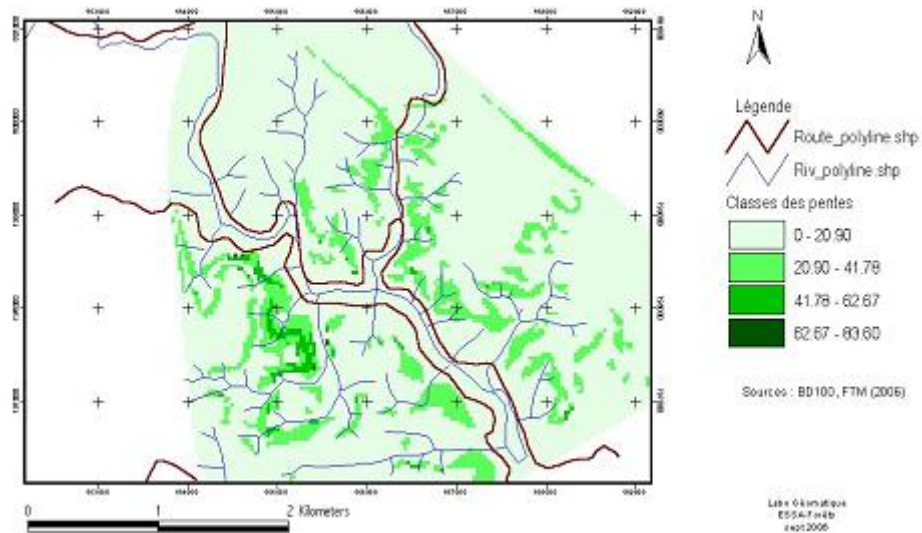


Figure 2 : Climadiagramme de Mandraka (selon le modèle de Walter et Lieth, 1976)

### **Relief et topographie**

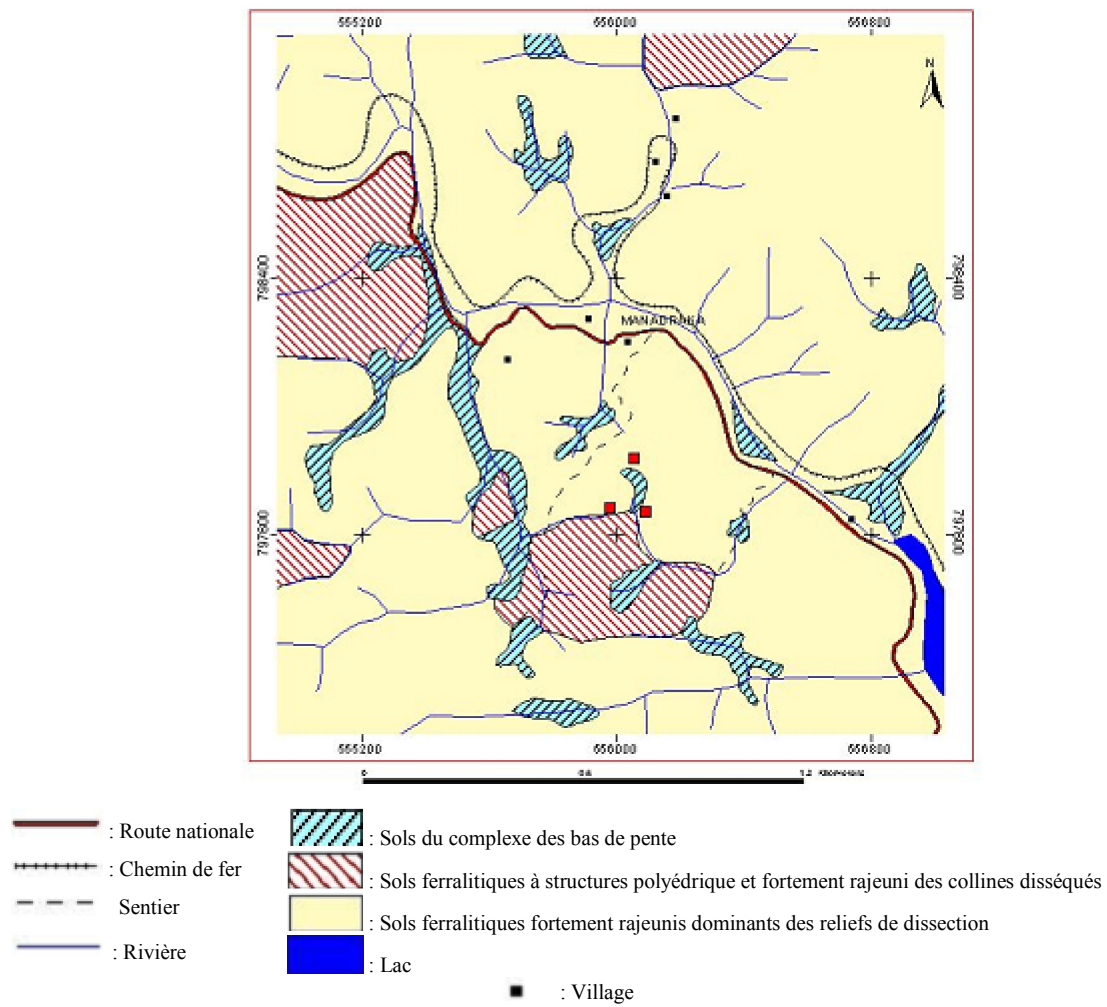
Le site d'essai de provenance de *Liquidambar styraciflua* à Mandraka se situe sur la première falaise orientale de Madagascar. Le relief est très accidenté, les pentes sont en général supérieures à 60% pouvant atteindre 90%. La zone de Mandraka est caractérisée par de petits vallons et/ou des bas de pente très étroits, formés de cônes de déjections. Les réseaux hydrographiques sont très encaissés. Les styles de dissection des reliefs sont caractérisés par des versants très pentus (Rajoelison et *al*, 2007) (Carte 2).



Carte 2 : Classification des pentes dans la zone de Mandraka

### **Pédologie**

La zone de Mandraka est caractérisée par un sol très friable et très vulnérable à l'érosion. Elle se repose généralement sur un sol ferralitique basé sur un socle ancien. Le socle géologique est constitué de migmatites granitoïdes sur lesquelles repose un socle humifère très friable, s'effondrant facilement. Les peuplements artificiels se trouvent sur des sols forestiers avec un horizon humifère allant de 15 à 25 cm, et basés sur un socle ancien de granite migmatique (Rajoelison et *al*, 2007) (Carte3).



Carte3 : Pedomorphologie de la zone de Mandraka

**ANNEXE 3 : SCRIPT R POUR LES TRAITEMENTS STATISTIQUES DES DONNEES****Package:**

- ade4 : Analysis of Ecological Data : Exploratory and Euclidean methods in Environmental sciences Linear and Nonlinear Mixed Effects Models (install.packages("ade4", dependencies=TRUE))
- lme4 : Linear mixed-effects models using S4 classes (install.packages("lme4", dependencies=TRUE))
- nlme : Linear and Nonlinear Mixed Effects Models install.packages("nlme", dependencies=TRUE)

**#importations des données**

```
D=read.table(file.choose(), sep = "\t", dec = ".", header = T)#Pour la germination et la croissance juvénile
```

```
D=read.table(file.choose(), sep = "\t", dec = ".", header = T) #pour les propriétés physico-mecaniques utilisant des éprouvettes standardisées
```

```
D=read.table(file.choose(), header=TRUE) #Pour les carottes  
data=na.omit(D)
```

**#analyse de variance pour la germination**

```
fm=glm(germin~substrat+bloc+prov+repet+bloc*prov+bloc*repet+prov*repet+substrat*bloc+substrat*prov+substrat*repet)  
anova(fm)  
summary(anova(fm))  
aov(fm)  
summary(aov(fm))
```

**#analyse de variance pour la croissance juvénile**

```
fm3=lmer(X32jrs~bloc+rep+prov+bloc*rep+(1|lot), data=data)
```

**#corrélation date de suivie**

```
names(data)  
pairs(data[,c(7:15)])
```

**#analyse de variance pour les propriétés physico-mécaniques avec les éprouvettes standardisées**

```
fm <- lmer(moe ~ bloc+provenance+arbre+(1|provenance)+(1|arbre)+(arbre|provenance), data=data)
summary(fm)
anova(fm)
summary(anova(fm))
aov(fm)
summary(aov(fm))
```

**#Analyse de variance pour les propriétés physico-mécaniques avec les carottes**

```
fm <- lmer(moespir ~ bloc+provenance+bloc:provenance+carotte+bloc*carotte+(1|carotte), data=data)
```

**#estimation de l'héritabilité**

```
fm <- lmer(rr ~ bloc+provenance+(1|carotte)+(carotte|provenance)+(1|provenance), data=data)
summary(aov(fm))
```

**# Analyse des résidus**

- Histogramme des résidus

```
X11(); hist(fm$residuals, freq=F, xlab="", main="Résidus")
lines(density(fm$residuals), col="red")
f <- function(t){dnorm(t, mean=mean(fm$residuals), sd= sd(fm$residuals))}
curve(f, add=T, col="blue", lwd=3, lty=2) #courbe du loi normale
```

- Droite de Henry – QQ plot

```
qq_vec <- residuals(fm)
qq_vec <- (qq_vec - mean(qq_vec))/sd(qq_vec) # Centré - réduit
X11();
qqnorm(qq_vec); abline(0, 1, lty = 2)
shapiro.test(residuals(fm))
```

## ANNEXE 4 : PROPRIETES PHYSICO-MECANQUES DES ARBRES D'ECLAIRCIES

Arbres	Bloc	Provenance	Diamètre (cm)	Hauteur (m)	Mvol (Kg/m <sup>3</sup> )	MOE (Mpa)	MOC (Mpa)	MOR (Mpa)	COMP (Mpa)	Dur	Rr (%)	Rt (%)	Infra	PSF (%)
1	I	Yucul	32,63	22,7	698,4	15484	990	114,6	52,2	3,54	6,39	13,59	0,518	37,18
2	I	Yucul	33,1	23,1	564,94	11714	1517	78,2	40,6	1,69	4,58	11,24	0,438	34,24
3	I	Yucul	21,96	15,6	603,59	13387	882	94,9	43	2,08	5,55	12,23	0,471	35,74
4	I	Los Alpes	25,94	19,3	628,22	13421	1045	100,1	48,5	2,56	5,07	12,25	0,492	34,61
5	I	Los Alpes	26,26	19,5	611,6	14732	904	100,3	49	2,3	5,46	12,28	0,478	35,83
6	I	Los Alpes	24,83	17,3	613,49	12653	1403	107,5	44,9	2,39	5,9	12,72	0,474	38,17
7	I	San Esteban	17,19	12,2	611,33	15184	736	80,3	44,8	2,91	7,07	11,19	0,469	38,13
9	I	San Esteban	31,19	17,1	673,26	10797	2197	101	41,4	3,24	6,27	12,97	0,495	38,93
10	I	Tactic	29,6	14,9	633,45	14431	941	109,6	45,2	2,75	5,53	12,7	0,497	35,49
11	I	Tactic	22,28	13,5	618	15284	939	111,1	46,2	2,25	5,76	12,5	0,475	35,56
12	I	Tactic	30,08	18,8	597,43	13490	928	98,7	39,9	1,96	5,4	12,15	0,462	
13	I	Tutule	24,99	15	639,32	10777	1585	96,6	43,2	2,59	5,18	12,51	0,479	36,9
14	I	Tutule	31,83	18,9	581,88	12384	1019	81,3	45,1	1,83	4,7	11,68	0,45	35,29
15	I	Tutule	32,31	16,4	676,69	13795	1107	116	47,9	2,85	5,81	12,56	0,509	36,35
16	I	Las Lajas	28,65	19,9	615,45	15461	902	111,7	42,1	2,12	5,32	12,65	0,502	34,26
17	I	Las Lajas	21,65	12,9	617,45	14221	1265	107,6	46,9	2,11	5,75	12,35	0,485	
18	I	Las Lajas	18,24	10,5	626,82	12104	994	97,4	42,8	2,57	5,38	12,86	0,473	39,1
19	I	Finca Las Victorias	34,7	23	703,65	18041	972	120,9	47,1	2,15	6,36	13,2	0,514	
20	I	Finca Las Victorias	20,85	15,3	653,85	16242	1129	121,5	49,5	3,07	6,47	12,32	0,516	35,35
21	I	Finca Las Victorias	14,2	10,6	606,05	15803	797	106,2	44,9	1,89	5,2	12,53	0,494	
22	I	Buenos Aires	39,79	21,4	685,79	14992	1109	80,8	42,7	2,61	4,97	12,63	0,516	

23	I	Buenos Aires	31,51	20,5	712,24	17374	1101	105,3	48	3,35	4,97	12,19	0,524	33,57
24	I	Buenos Aires	28,33	17,8	655,4	15407	895	117,9	51,3	2,61	5,22	11,74	0,511	
25	I	Huatusco	30,24	19	706,55	14692	1018	112,2	46,6	3,46	5,32	12,45	0,53	33,58
26	I	Huatusco	28,33	13,6	723,51	16313	902	109,3	46	2,74	5,53	13,05	0,523	
27	I	Huatusco	29,6	13,2	747,54	17201	1307	138,5	59	4,67	6,24	12,57	0,558	34,27
28	III	Finca Las Victorias	42,34	21	682,11	17215	1060	128,4	47,6	2,87	5,78	11,76	0,534	32,19
29	III	Finca Las Victorias	33,1	23	629,5	17300	870	69,2	41,2	2,28	5,21	11,87	0,502	32,84
30	III	Finca Las Victorias	32,79	15,7	709,64	19413	921	121,3	42	2,98	5,78	13,33	0,558	34,51
31	III	Huatusco	31,51	13,5	742,9	16866	1117	108,9	47,3	3,26	5,73	13,56	0,576	33,45
32	III	Huatusco	35,65	17,5	703,36	14484	1260	131,3	44,7	3,19	5,43	12,67	0,552	33,4
33	III	Huatusco	27,69	16,3	690,88	17033	1139	116,2	45,5	3,14	6	12,23	0,544	32,76
34	III	Las Lajas	37,88	18,5	670,03	17364	1029	119,6	42,7	2,41	5,73	12,73	0,539	34,33
35	III	Las Lajas	57,3	24	699,42	14580	1140	98,3	39,9	3,2	5,85	11,8	0,543	33,64
36	III	Las Lajas	34,38	16,4	695,65	19358	1078	88,9	49,2	2,84	6,51	12,44	0,542	33,23
37	III	Yucul	30,24	13,7	721,16	15781	1262	110,2	47,8	3,48	6,41	12,12	0,552	32,99
38	III	Yucul	37,88	16,8	695,46	19117	951	106	47,2	2,8	6,23	13,27	0,553	34,52
39	III	Yucul	35,65	9,4	647,36	15566	983	84,6	41	2,34	4,74	12,45	0,526	33,2
40	III	Los Alpes	28,01	18	595,87	14930	1071	99,5	44,5	1,8	5,18	11,53	0,479	33,2
41	III	Los Alpes	32,15	19	699,49	17185	1519	113,3	44,5	2,84	5,71	13,04	0,55	34,65
42	III	Los Alpes	32,15	19	665,76	16258	1097	106	42,6	2,38	5,43	12,28	0,517	34,39
43	III	San Esteban	35,33	22	651,04	13048	1255	74,6	38,8	2,07	6,11	13,94	0,492	36,12
44	III	San Esteban	35,65	4,6	657,58	15153	1495	79,7	48,3	2,36	5,84	11,63	0,517	32,52
45	III	San Esteban	35,01	17	659,68	14699	926	113,6	42,2	2,69	6,28	11,81	0,528	33,63
46	III	Tactic	40,11	19	705,27	16227	1099	105,6	44,7	3,2	5,38	11,85	0,551	32,83



47	III	Tactic	34,54	18	707,55	18119	1037	108,6	49,9	2,97	6,02	13,33	0,563	33,42
48	III	Tactic	31,67	18	681,61	15417	1074	101,8	46,1	2,71	5,41	10,95	0,524	31,41
49	III	Buenos Aires	38,36	19	635,69	16397	961	95,2	44,7	2,31	5,46	12,17	0,502	33,81
50	III	Buenos Aires	34,54	16,2	670,51	17231	1021	104,7	50,5	2,28	6,06	11,72	0,522	32,16
51	III	Tutule	48,7	20	712,36	15189	1644	95,8	47,4	3	6,03	12,26	0,553	33,22
52	III	Tutule	40,27	19,5	629,34	16512	834	109,9	43,8	2,14	5,66	11,52	0,512	33,01
53	III	Tutule	35,97	21	692,19	16092	1207	88,1	46,2	2,9	5,63	12,43	0,538	32,99
54	III	Tutule	42,97	17	635,17	15498	1161	99	44,9	2,22	4,91	11,68	0,502	32,06

#### ANNEXE 5 : PROPRIETES PHYSICO-MECANQUES DES ARBRES DOMINANTS ET CO-DOMINANTS

Arbres	Bloc	Provenance	Diamètre (cm)	Hauteur (m)	Mvol (Kg/m <sup>3</sup> )	MOE Usan (Mpa)	MOE SPIR (Mpa)	PSF SPIR (%)	INFRA SPIR	COMP SPIR (Mpa)	MOR SPIR (Mpa)	Dur SPIR	Rt SPIR (%)	Rr SPIR (%)
1	I	Yucul	43,93	27	667,1	15802	15748	33,52	0,54	50,9	120,3	3,94	13,12	5,97
2	I	Yucul	42,65	27,5	673,6	14911	14335	35,21	0,522	45,3	100	3,82	13,2	6,09
3	I	Yucul	47,43	29	668,4	15071	13926	35,22	0,531	46	99,6	3,63	13,51	6,15
4	I	Los Alpes	40,43	27,5	615,4	12539	14092	33,69	0,513	48,8	102,4	3,56	12,76	5,78
5	I	Los Alpes	42,65	28	673,3	16174	15643	34,4	0,524	48	105	3,51	13,32	6,2
6	I	Los Alpes	42,02	27,5	638,9	14498	15651	33,23	0,525	50,6	102,6	3,68	13,11	5,97
7	I	San Esteban	48,38	27,5	638,4	14549	15455	35,69	0,533	45	101,6	3,95	13,7	6,4
8	I	San Esteban	46,47	28	631,6	14709	14656	34,14	0,521	47,4	85	3,65	12,96	5,83
9	I	San Esteban	46,79	28	652,8	14828	14626	34,85	0,532	46,2	97,4	3,69	12,96	5,96
10	I	Tactic	34,38	25	703	15746	16105	35,29	0,533	48	108,7	3,69	12,99	6,16
11	I	Tactic	41,38	28	636,7	13215	13043	35,22	0,508	46,2	96,3	3,29	12,08	5,65
12	I	Tactic	33,1	25	644,6	16085	15921	34,4	0,554	51,1	101,7	3,55	13,21	6

13	I	Tutul	45,84	31	633,9	13657	12706	36,2	0,523	42,2	87,9	3,58	13,45	6,11
14	I	Tutul	37,56	27,5	603,4	13493	13961	33,68	0,546	46,4	82,9	3,73	13,06	5,72
15	I	Tutul	37,24	27	603,7	14835	15014	34,14	0,543	48,4	99,2	3,3	13,35	5,9
16	I	Huatusco	42,97	27	736,9	16063	15225	34,95	0,545	49	114,7	4,15	13,12	5,82
17	I	Huatusco	41,06	26	720,6	16771	15066	34,78	0,55	47,5	90,7	3,89	13,12	5,77
18	I	Huatusco	47,47	26	654	15755	16095	33,72	0,543	49,2	106,1	4,34	13,11	5,93
19	I	Buenos Aires	54,43	31	611,1	14619	14871	35,44	0,516	46,1	98,8	3,4	12,74	5,84
20	I	Buenos Aires	44,25	27,5	684,3	15773	15366	34,59	0,542	48,4	113,3	4,11	13,22	6,17
21	I	Buenos Aires	41,06	27	628,3	15796	17208	34,38	0,545	52,7	112,7	3,68	13,78	6,29
22	I	Finca Las Victorias	47,75	30	723	16745	16097	34,17	0,527	51,7	117,8	3,73	12,71	6,08
23	I	Finca Las Victorias	42,34	27	681,8	16685	15522	34,6	0,531	51,1	118,8	3,48	13,1	6,03
24	I	Finca Las Victorias	47,11	30	654,1	16428	15261	34,45	0,519	47,3	90,1	3,14	13,08	6,08
25	I	Las Lajas	47,75	28	672,5	15544	14796	35,05	0,528	46,2	92,2	3,64	13,22	6,13
26	I	Las Lajas	36,29	25,5	649,3	15082	16030	34,3	0,54	50,6	108,8	3,57	13,17	6,01
27	I	Las Lajas	40,74	26,5	644	15552	15745	34,85	0,53	49,3	100,4	3,32	12,92	6
28	II	San Esteban	49,97	28	699,4	16763	16554	34,05	0,551	48,4	107,4	3,75	13,46	6,3
29	II	San Esteban	47,75	27	645,1	16087	17373	33,08	0,545	51,2	107,4	3,42	12,69	5,82
30	II	San Esteban	38,52	24	630,9	15859	16284	33,75	0,545	50,5	111,8	3,32	12,92	5,88
31	II	Las Lajas	51,57	30	650,3	15770	14905	34,37	0,54	46,9	99,4	3,23	12,76	5,83
32	II	Las Lajas	54,43	30,5	752,3	17405	15417	35,29	0,525	46,3	99,5	3,72	13,12	6,2
33	II	Las Lajas	40,43	26	651	16270	16013	33,47	0,542	49,7	98	3,59	12,96	5,93
34	II	Yucul	53,48	31	649,4	15242	15896	34,24	0,534	47,4	94,6	3,78	13,33	5,97

35	II	Yucul	43,29	28	658,8	16532	15347	34,01	0,546	47,6	94,8	3,48	13,08	5,83
36	II	Yucul	38,83	25	638,5	15203	16038	33,52	0,526	49	98,4	3,44	13,19	5,97
37	II	Tactic	38,83	28	659,9	16950	16514	33,68	0,527	50,6	100,1	3,47	13,18	5,96
38	II	Tactic	34,06	19,5	669,9	16411	16143	33,7	0,531	50,8	99,6	3,89	13,04	5,96
39	II	Tactic	38,52	27,5	614,4	14380	16145	33,86	0,533	49	94,5	3,45	13,28	5,92
40	II	Los Alpes	41,06	27	664,8	15997	16360	34,66	0,536	46,8	87,7	3,59	13,58	6,06
41	II	Los Alpes	46,47	30	671,5	16590	16405	34,09	0,541	51,1	112,4	3,42	12,93	5,71
42	II	Los Alpes	41,06	27	661,5	14991	15267	33,43	0,52	49,2	100	3,61	13,07	5,91
43	II	Huatusco	53,79	30,5	752	13917	14664	34,24	0,517	47,5	99,6	4,45	13,09	6,12
44	II	Huatusco	44,88	27	622,7	13164	13263	34,38	0,521	48,2	89,9	3,83	12,89	5,61
45	II	Huatusco	38,83	25	632,7	14342	14151	34,21	0,528	47,8	89,2	3,44	13,07	5,85
46	II	Tutul	40,74	28,5	747,5	17167	15455	33,11	0,53	50,8	99,8	3,8	13,11	5,89
47	II	Tutul	32,79	25,5	661	15548	15820	33,39	0,543	50,5	93,4	3,67	13,66	5,93
48	II	Tutul	43,29	30	650,8	16279	15602	33,21	0,529	49,4	91,5	3,46	12,87	5,74
49	III	Yucul	32,47	24	679,3	17280	16440	33,5	0,545	52,7	112,2	3,66	13,56	6,12
50	III	Yucul	37,24	25	642,7	16030	14763	34,69	0,529	50,5	109	3,48	13,18	6,03
51	III	Yucul	38,2	25	615,1	14347	13737	35,97	0,526	47,8	96,9	3,62	13,53	6,17
52	III	Los Alpes	37,24	26	640,1	13871	14603	34,65	0,534	48,8	95	3,58	12,83	5,84
53	III	Los Alpes	41,38	27	690,1	15471	14921	34,8	0,54	49,6	99,5	3,9	13,1	6,03
54	III	Los Alpes	41,38	27	634,5	14741	15376	34,76	0,543	50,3	93,8	3,52	12,88	5,8
55	III	San Esteban	38,83	26	672,6	15603	14832	34,99	0,532	49	98,5	3,34	13,27	6,11
56	III	San Esteban	39,47	25	613,8	13987	14030	35,91	0,537	47,7	95,9	3,19	13,18	5,88
57	III	San Esteban	38,2	25	595,6	14988	15557	34,07	0,541	50,6	91	3,13	13,04	5,87
58	III	Tactic	37,24	26,5	623,9	15087	14417	35,48	0,533	48	91,6	3,3	13,15	5,95
59	III	Tactic	38,2	27	712,5	17644	14298	35,15	0,523	47,8	87,2	3,58	12,98	5,84
60	III	Tactic	38,2	27	705,1	17292	14304	35,17	0,53	48,8	100,2	3,36	13,35	5,91

61	III	Las Lajas	47,11	28	718,7	16400	14728	33,22	0,519	46,4	74,7	4,18	13,6	6,51
62	III	Las Lajas	49,97	29,5	717,7	15378	13888	30,56	0,524	44	71,2	4,02	13,44	6,18
63	III	Las Lajas	37,24	25	695,3	16471	15292	33,51	0,545	50,1	118,2	3,97	13,37	6,01
64	III	Huatusco	35,97	24,5	662,6	14573	15073	33,78	0,545	49,6	115,4	4,24	13,41	6,1
65	III	Huatusco	48,06	29	666	15195	14638	33,74	0,546	46,5	104,8	3,9	13,39	6,17
66	III	Huatusco	37,24	25	655	15380	14231	34,43	0,522	47,1	103,1	3,27	12,62	5,76
67	III	Buenos Aires	39,79	26	662,9	16265	14986	33,64	0,524	48,8	101,1	3,27	12,62	5,39
68	III	Buenos Aires	49,66	30	599,9	15576	16501	34,19	0,534	51,4	107,6	3,23	13,29	6,1
69	III	Buenos Aires	43,29	27	588,7	13833	15004	34,57	0,518	50,8	100,6	3,54	12,66	5,74
70	III	Tutul	43,93	30,5	640,7	15351	14269	35,08	0,518	48,1	95,7	3,14	13,06	5,98
71	III	Tutul	38,52	27	622,6	14073	14431	32,92	0,523	49,5	88,3	3,67	12,94	5,96
72	III	Tutul	42,97	30	709,3	16405	13947	34,67	0,521	46,9	103,9	3,95	12,82	5,97
73	III	Finca Las Victorias	49,02	31	681,7	16818	16357	34,05	0,53	51	100,4	3,85	13,55	6,37
74	III	Finca Las Victorias	42,65	27,5	675,6	16031	15003	35,56	0,521	48,6	104,1	3,57	13,35	6,26
75	III	Finca Las Victorias	42,34	27	677,4	15863	14776	34,78	0,521	49,9	101	3,66	13,02	5,93
76	IV	Las Lajas	35,33	25	612,6	14319	13476	36,66	0,516	46,9	92,5	2,96	13,37	5,99
77	IV	Las Lajas	38,52	25,5	714,2	18987	16566	35,64	0,541	50,7	118	3,82	13,85	6,5
78	IV	Las Lajas	39,15	26	660	16789	16793	34,09	0,547	53,4	123,3	3,88	13,44	6,23
79	IV	Finca Las Victorias	41,7	27	751,6	19875	17849	34,68	0,552	52	118,7	4,21	13,94	6,4
80	IV	Finca Las Victorias	40,74	27,5	672,4	19012	19077	32,89	0,549	55,7	118,1	3,87	13,71	6,5
81	IV	Finca Las	39,47	27	614,7	15425	16010	34,39	0,534	51,2	111,6	3,54	13,24	6,16

		Victorias												
82	IV	Yucul	50,93	31	662,9	16706	16790	34,26	0,536	51,5	107,4	4,01	13,6	6,39
83	IV	Yucul	41,7	27	636,5	15882	16350	35,32	0,539	49,3	109	3,97	13,53	6,26
84	IV	Yucul	41,38	27	663,2	16199	16986	34,48	0,524	49,2	95,9	3,24	13,66	6,32
85	IV	Tutul	47,11	31,5	627	14690	15720	34,36	0,531	52,3	106,4	3,84	13,15	6,09
86	IV	Tutul	40,43	28	674,8	16152	16102	34,35	0,536	50,8	100,6	3,72	13,26	6,16
87	IV	Tutul	41,7	29	663,1	15023	15040	34,2	0,527	49,4	99,6	3,84	13,17	6,25
88	IV	San Esteban	54,43	30	695,2	15910	15861	35,22	0,53	49,5	105,5	4,11	13,14	6,35
89	IV	San Esteban	37,24	25	656,1	15755	16187	35,41	0,546	50,2	103,1	4,16	14,12	6,59
90	IV	San Esteban	52,52	29	667	15427	16109	33,83	0,538	51,9	112,2	4,09	13,21	6,16
91	IV	Buenos Aires	50,29	30,5	643	14661	15739	34,31	0,534	50,7	113,4	3,95	13,08	6,05
92	IV	Buenos Aires	38,83	26	635,9	15425	16496	34,17	0,544	51,3	113,4	3,56	13,4	6,08
93	IV	Buenos Aires	47,27	27	627	15824	15218	34,81	0,534	49,3	110,8	3,68	13,44	6,12
94	IV	Tactic	38,2	27	698,8	16750	15536	35,64	0,544	49,6	125,6	4,38	13,61	6,53
95	IV	Tactic	44,25	30	678,4	15123	15280	34,77	0,535	49,1	107,9	4,03	13,24	6,02
96	IV	Tactic	45,84	31	670,1	15562	14779	35,11	0,53	48,5	103,9	3,94	12,85	6,07
97	IV	Los Alpes	41,33	26	665,9	14872	15255	34,15	0,523	49,3	96	3,89	13,36	6,11
98	IV	Los Alpes	48,38	30	659,3	14896	14120	35,36	0,523	47	99,5	3,39	12,9	5,9
99	IV	Los Alpes	42,65	28	688,1	17246	15903	35,55	0,534	47,3	106,4	3,69	13,61	6,33

**ANNEXE 6 : CLASSEMENT DES PROVENANCES, DES BLOCS ET DES SUBSTRATS SELON LES CARACTERES DE MULTIPLICATION, DE CROISSANCE ET DES PROPRIETES PHYSICO-MECANQUES DU BOIS DE LIQUIDAMBAR**

**Classement des provenances selon la hauteur et le diamètre à 13 ans et à 22 ans de l'essai de *Liquidambar styraciflua* à Mandraka**

Provenance	Hauteur à 13 ans (m)	Provenance	Diamètre à 13 ans (cm)	Provenance	Diamètre à 22 ans (cm)
Buenos Aires	21,04 <sup>a</sup>	Finca las Victorias	24,01 <sup>a</sup>	Buenos Aires	38,07 <sup>a</sup>
Finca las Victorias	20,57 <sup>ab</sup>	Buenos Aires	23,96 <sup>ab</sup>	Finca las Victorias	36,47 <sup>ab</sup>
San Esteban	20,50 <sup>ab</sup>	Yucul	22,98 <sup>abc</sup>	Tutule	35,05 <sup>abc</sup>
Las Lajas	20,33 <sup>abc</sup>	Las Lajas	22,33 <sup>abcd</sup>	San Esteban	34,79 <sup>bc</sup>
Montebello	19,75 <sup>abcd</sup>	San Esteban	22,18 <sup>bcd</sup>	Los Alpes	34,88 <sup>bc</sup>
Los Alpes	19,74 <sup>abcd</sup>	Los Alpes	22,18 <sup>bcd</sup>	Gomez Farias	33,91 <sup>bcd</sup>
Yucul	19,36 <sup>bcd</sup>	Montebello	21,34 <sup>cde</sup>	Yucul	34,27 <sup>bcd</sup>
Tactic	19,13 <sup>cde</sup>	Tactic	21,21 <sup>de</sup>	Tactic	32,57 <sup>cde</sup>
Tutule	18,92 <sup>de</sup>	Tutule	20,68 <sup>de</sup>	Las Lajas	32,99 <sup>cde</sup>
Gomez Farias	18,53 <sup>de</sup>	Gomez Farias	20,63 <sup>de</sup>	Huatusco	31,8 <sup>def</sup>
Huatusco	18,04 <sup>e</sup>	Huatusco	20,02 <sup>e</sup>	Montebello	30,79 <sup>ef</sup>
Zacualtipan	13,28 <sup>f</sup>	Zacualtipan	16,52 <sup>f</sup>	Zacualtipan	27,67 <sup>f</sup>

<sup>a, ab, ...</sup> : Classification des groupes non significativement différents selon la méthode de Holm

**Classement des provenances selon la hauteur et le diamètre à 25 ans de l'essai de *Liquidambar styraciflua* à Mandraka**

Provenance	Hauteur moyenne (m)	Provenance	Diamètre moyen (cm)
Finca Las Victorias	27,6 <sup>a</sup>	Buenos Aires	42,65 <sup>a</sup>
Buenos Aires	27,3 <sup>ab</sup>	Finca Las Victorias	41,38 <sup>a</sup>
Tutul	27,2 <sup>ab</sup>	Los Alpes	39,15 <sup>ab</sup>
Los Alpes	26,9 <sup>ab</sup>	San Esteban	39,15 <sup>ab</sup>
Yucul	25,9 <sup>abc</sup>	Yucul	38,83 <sup>ab</sup>
Tactic	25,8 <sup>abc</sup>	Tutul	38,2 <sup>ab</sup>
San Esteban	25,5 <sup>bc</sup>	Las Lajas	36,29 <sup>ab</sup>
Las Lajas	25,0 <sup>c</sup>	Huatusco	36,29 <sup>ab</sup>
Huatusco	24,5 <sup>c</sup>	Tactic	35,33 <sup>b</sup>

<sup>a, ab, ...</sup> : Classification des groupes non significativement différents selon la méthode de Holm

**Classement des provenances selon la germination des graines de *Liquidambar styraciflua* de Mandraka**

Provenance	Germination (%)
Buenos Aires	91 <sup>a</sup>
Tutul	89 <sup>a</sup>
Finca Las Victorias	87 <sup>ab</sup>
Yucul	86 <sup>ab</sup>
Tactic	83 <sup>ab</sup>
Las Lajas	82 <sup>ab</sup>
Los Alpes	81 <sup>ab</sup>
San Esteban	78 <sup>b</sup>
Huatusco	74 <sup>b</sup>

<sup>a, ab, ...</sup> : Classification des groupes non significativement différents selon la méthode de Holm

**Classement des substrats selon la germination des graines de *Liquidambar styraciflua* de Mandraka**

Substrat	Germination (%)
AGAR	90 <sup>a</sup>
Plate Bande	83 <sup>b</sup>
SABLE Chambre de Germination	80 <sup>b</sup>
SABLE Boîte de Pétri	78 <sup>b</sup>

*a, ab, ... : Classification des groupes non significativement différents selon la méthode de Holm*

**Classement des blocs selon la germination des graines de *Liquidambar styraciflua* de Mandraka**

Bloc	Germination (%)
I	87 <sup>a</sup>
III	83 <sup>b</sup>
IV	82 <sup>b</sup>
II	79 <sup>b</sup>

*a, ab, ... : Classification des groupes non significativement différents selon la méthode de Holm*

**Classement des blocs dans chaque substrat selon la germination des graines de *Liquidambar styraciflua* de Mandraka**

Blocs de répétition des arbres-mères	Germination (%)			
	SABLE Boîte de Pétri	AGAR	SABLE Chambre de Germination	Plate Bande
I	85 <sup>a</sup>	96 <sup>a</sup>	91 <sup>a</sup>	78 <sup>a</sup>
II	72 <sup>a</sup>	87 <sup>b</sup>	71 <sup>b</sup>	87 <sup>a</sup>
III	80 <sup>a</sup>	90 <sup>b</sup>	78 <sup>b</sup>	84 <sup>a</sup>
IV	74 <sup>a</sup>	88 <sup>b</sup>	80 <sup>b</sup>	86 <sup>a</sup>

*a, ab, ... : Classification des groupes non significativement différents selon la méthode de Holm*



**Classement des provenances dans chaque substrat selon la germination des graines de *Liquidambar styraciflua* de Mandraka**

Provenance	Germination (%)			
	SABLE Boîte de Pétri	AGAR	SABLE Chambre de Germination	Plate Bande
Buenos Aires	87 <sup>a</sup>	95 <sup>ab</sup>	90 <sup>a</sup>	83 <sup>a</sup>
Tutul	86 <sup>a</sup>	93 <sup>ab</sup>	83 <sup>a</sup>	84 <sup>a</sup>
Las Lajas	85 <sup>a</sup>	79 <sup>c</sup>	90 <sup>a</sup>	86 <sup>a</sup>
Yucul	84 <sup>a</sup>	88 <sup>abc</sup>	74 <sup>b</sup>	78 <sup>a</sup>
Finca Las Victorias	84 <sup>a</sup>	96 <sup>a</sup>	66 <sup>b</sup>	84 <sup>a</sup>
Los Alpes	81 <sup>a</sup>	84 <sup>bc</sup>	81 <sup>a</sup>	89 <sup>a</sup>
Tactic	78 <sup>a</sup>	91 <sup>ab</sup>	79 <sup>a</sup>	84 <sup>a</sup>
San Esteban	68 <sup>a</sup>	93 <sup>ab</sup>	86 <sup>a</sup>	82 <sup>a</sup>
Huatusco	48 <sup>b</sup>	92 <sup>ab</sup>	81 <sup>a</sup>	80 <sup>a</sup>

<sup>a, ab, ...</sup> : Classification des groupes non significativement différents selon la méthode de Holm

**Classement des provenances selon la hauteur des descendants de *Liquidambar styraciflua* de Mandraka**

Provenance/Âge	Hauteur (cm)							
	21 Jrs	32 Jrs	41Jrs	57 Jrs	86 Jrs	131 Jrs	320 Jrs	425 Jrs
Buenos Aires	2,9 <sup>bc</sup>	4,2 <sup>abc</sup>	5,50 <sup>bc</sup>	6,7 <sup>bc</sup>	7,1 <sup>b</sup>	10,7 <sup>bc</sup>	14,7 <sup>ef</sup>	19,7 <sup>bc</sup>
Finca Las Lajas Victorias	2,9 <sup>bc</sup>	4,1 <sup>bc</sup>	5,33 <sup>cd</sup>	6,5 <sup>c</sup>	7,2 <sup>b</sup>	11,2 <sup>abc</sup>	15,8 <sup>cde</sup>	20,4 <sup>abc</sup>
Huatusco	3,1 <sup>b</sup>	4,2 <sup>abc</sup>	5,76 <sup>ab</sup>	6,9 <sup>abc</sup>	7,5 <sup>ab</sup>	10,5 <sup>c</sup>	13,9 <sup>f</sup>	17,7 <sup>c</sup>
Las Lajas	3,2 <sup>a</sup>	4,4 <sup>a</sup>	5,89 <sup>a</sup>	7,1 <sup>a</sup>	7,8 <sup>a</sup>	11,4 <sup>ab</sup>	16,4 <sup>bcd</sup>	21,1 <sup>ab</sup>
Los Alpes	2,9 <sup>bc</sup>	4,2 <sup>ab</sup>	5,46 <sup>bc</sup>	7,0 <sup>ab</sup>	7,5 <sup>ab</sup>	11,6 <sup>a</sup>	17,2 <sup>ab</sup>	21,1 <sup>ab</sup>
San Esteban	2,8 <sup>c</sup>	4,1 <sup>bc</sup>	5,29 <sup>cd</sup>	6,8 <sup>abc</sup>	7,4 <sup>ab</sup>	11,6 <sup>a</sup>	17,8 <sup>a</sup>	22,7 <sup>a</sup>
Tactic	2,8 <sup>c</sup>	3,9 <sup>c</sup>	5,11 <sup>d</sup>	6,4 <sup>c</sup>	7,0 <sup>b</sup>	10,7 <sup>bc</sup>	15,3 <sup>de</sup>	19,5 <sup>bc</sup>
Tutul	2,8 <sup>bc</sup>	4,1 <sup>bc</sup>	5,35 <sup>cd</sup>	6,8 <sup>abc</sup>	7,3 <sup>b</sup>	11,4 <sup>ab</sup>	17,0 <sup>abc</sup>	20,7 <sup>ab</sup>
Yucul	2,9 <sup>bc</sup>	4,2 <sup>abc</sup>	5,46 <sup>bc</sup>	6,8 <sup>abc</sup>	7,3 <sup>b</sup>	11,1 <sup>abc</sup>	15,7 <sup>cde</sup>	19,4 <sup>bc</sup>

<sup>a, ab, ...</sup> : Classification des groupes non significativement différents selon la méthode de Holm

**Classement des blocs des arbres-mères selon la hauteur des descendants de *Liquidambar styraciflua* de Mandraka**

Bloc/Âge	Hauteur (cm)							
	21 Jrs	32 Jrs	41Jrs	57 Jrs	86 Jrs	131 Jrs	320 Jrs	425 Jrs
I	3,1 <sup>a</sup>	4,0 <sup>c</sup>	5,5 <sup>a</sup>	5,1 <sup>c</sup>	7,1 <sup>c</sup>	10,8 <sup>b</sup>	15,8 <sup>b</sup>	20,2 <sup>a</sup>
II	3,0 <sup>b</sup>	4,1 <sup>b</sup>	5,6 <sup>a</sup>	5,5 <sup>bc</sup>	7,4 <sup>ab</sup>	10,9 <sup>b</sup>	15,4 <sup>b</sup>	20,3 <sup>a</sup>
III	2,9 <sup>b</sup>	4,4 <sup>a</sup>	5,6 <sup>a</sup>	5,6 <sup>a</sup>	7,5 <sup>a</sup>	11,6 <sup>a</sup>	16,1 <sup>b</sup>	20,1 <sup>a</sup>
IV	2,6 <sup>c</sup>	4,0 <sup>bc</sup>	5,1 <sup>b</sup>	5,6 <sup>b</sup>	7,2 <sup>bc</sup>	11,4 <sup>a</sup>	17,1 <sup>a</sup>	21,2 <sup>a</sup>

*a, ab, ... : Classification des groupes non significativement différents selon la méthode de Holm*

### **Classement provenances selon les propriétés physico-mécaniques du bois des arbres d'éclaircies de Liquidambar**

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (Mpa)	G (Mpa)	$\sigma_F$ (Mpa)	C (Mpa)	N	Rr (%)	Rt (%)	infra	PSF (%)
Nombre d'éprouvette (n)	233	236	235	262	271	283	286	286	286	254
Buenos Aires	666,5 <sup>b</sup>	16 432,7 <sup>ab</sup>	887,0 <sup>b</sup>	100,8 <sup>ab</sup>	47,1 <sup>ab</sup>	2,59 <sup>b</sup>	5,37 <sup>a</sup>	12,10 <sup>a</sup>	0,514 <sup>b</sup>	33,21 <sup>b</sup>
Finca Las Victorias	674,0 <sup>b</sup>	17401,3 <sup>a</sup>	905,6 <sup>b</sup>	111,0 <sup>ab</sup>	45,0 <sup>ab</sup>	2,64 <sup>b</sup>	5,78 <sup>a</sup>	12,47 <sup>a</sup>	0,523 <sup>ab</sup>	33,43 <sup>b</sup>
Huatusco	716,8 <sup>a</sup>	16043,3 <sup>ab</sup>	986,0 <sup>b</sup>	120,7 <sup>a</sup>	48,2 <sup>a</sup>	3,46 <sup>a</sup>	5,72 <sup>a</sup>	12,72 <sup>a</sup>	0,548 <sup>a</sup>	33,46 <sup>b</sup>
Las Lajas	670,3 <sup>b</sup>	15 926,1 <sup>ab</sup>	922,4 <sup>b</sup>	103,2 <sup>ab</sup>	43,3 <sup>b</sup>	2,69 <sup>b</sup>	5,84 <sup>a</sup>	12,37 <sup>a</sup>	0,525 <sup>ab</sup>	34,35 <sup>b</sup>
Los Alpes	640,4 <sup>b</sup>	15 142,6 <sup>abc</sup>	981,3 <sup>b</sup>	105,2 <sup>ab</sup>	45,2 <sup>ab</sup>	2,38 <sup>b</sup>	5,48 <sup>a</sup>	12,37 <sup>a</sup>	0,504 <sup>b</sup>	34,97 <sup>ab</sup>
San Esteban	656,9 <sup>b</sup>	13 560,8 <sup>c</sup>	1062,9 <sup>a</sup>	90,3 <sup>b</sup>	42,7 <sup>b</sup>	2,57 <sup>b</sup>	6,19 <sup>a</sup>	12,52 <sup>a</sup>	0,505 <sup>b</sup>	36,31 <sup>a</sup>
Tactic	668,6 <sup>b</sup>	15 838,0 <sup>ab</sup>	908,7 <sup>b</sup>	106,0 <sup>ab</sup>	45,7 <sup>ab</sup>	2,71 <sup>b</sup>	5,58 <sup>a</sup>	12,22 <sup>a</sup>	0,521 <sup>ab</sup>	33,50 <sup>b</sup>
Tutul	657,7 <sup>b</sup>	14 651,3 <sup>bc</sup>	965,3 <sup>b</sup>	97,8 <sup>b</sup>	45,7 <sup>ab</sup>	2,53 <sup>b</sup>	5,47 <sup>a</sup>	12,05 <sup>a</sup>	0,512 <sup>b</sup>	33,90 <sup>b</sup>
Yucul	652,5 <sup>b</sup>	15 253,5 <sup>abc</sup>	933,3 <sup>b</sup>	97,8 <sup>b</sup>	45,0 <sup>ab</sup>	2,66 <sup>b</sup>	5,62 <sup>a</sup>	12,54 <sup>a</sup>	0,513 <sup>b</sup>	34,57 <sup>b</sup>

*E : module d'élasticité*

*G : module de cisaillement*

*$\sigma_F$  : Module de rupture en flexion 4 points*

*a, ab, ... : Classification des groupes non significativement différents selon la méthode de Holm*

*C : Module de rupture en compression axiale*

*N : dureté Monnin*

*n : nombre d'échantillon*

*Rr : retrait radial*

*Rt : retrait tangentiel*

*Infra : infradensité*

*PSF : point de saturation des fibres*

### **Classement des blocs selon les propriétés physico-mécaniques du bois des arbres d'éclaircies de Liquidambar**

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (Mpa)	G (Mpa)	$\sigma_F$ (Mpa)	C (Mpa)	N	Rr (%)	Rt (%)	infra	PSF (%)
Nombre d'éprouvette (n)	233	236	235	262	271	283	286	286	286	254
Bloc I	646,1 <sup>b</sup>	14201,6 <sup>b</sup>	963,5 <sup>a</sup>	104,9 <sup>a</sup>	46,3 <sup>a</sup>	2,67 <sup>a</sup>	5,56 <sup>a</sup>	12,45 <sup>a</sup>	0,496 <sup>b</sup>	35,82 <sup>a</sup>
Bloc III	677,1 <sup>a</sup>	16226,6 <sup>a</sup>	944,3 <sup>a</sup>	102,5 <sup>a</sup>	44,8 <sup>b</sup>	2,69 <sup>a</sup>	5,72 <sup>a</sup>	12,29 <sup>a</sup>	0,532 <sup>a</sup>	33,32 <sup>b</sup>

*E : module d'élasticité*

*G : module de cisaillement*

*$\sigma_F$  : Module de rupture en flexion 4 points*

*C : Module de rupture en compression axiale*

*N : dureté Monnin*

*n : nombre d'échantillon*

*Rr : retrait radial*

*Rt : retrait tangentiel*

*Infra : infradensité*

<sup>a, ab, ...</sup> : Classification des groupes non significativement différents selon la méthode de Holm

PSF : point de saturation des fibres

**Classement des provenances selon les propriétés physico-mécaniques du bois des arbres dominants et co-dominants de Liquidambar de Mandraka**

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	EL-UScan (Mpa)	EL-SPIR (Mpa)	$\sigma_{F-SPIR}$ (Mpa)	C-SPIR (Mpa)	N-SPIR	Rr-SPIR (%)	Rt-SPIR (%)	infra-SPIR	PSF-SPIR (%)
Nombre de mesure (n)	2532	1801	2532	2532	2532	2532	2532	2532	2532	2532
Buenos Aires	630,9 <sup>c</sup>	15250,9 <sup>c</sup>	15658,5 <sup>ab</sup>	107,8 <sup>a</sup>	49,8 <sup>b</sup>	3,62 <sup>b</sup>	5,98 <sup>c</sup>	13,13 <sup>bcd</sup>	0,532 <sup>bc</sup>	34,52 <sup>abc</sup>
Finca Las Victorias	682,6 <sup>a</sup>	16988,8 <sup>a</sup>	16207,4 <sup>a</sup>	108,6 <sup>a</sup>	50,9 <sup>a</sup>	3,67 <sup>b</sup>	6,20 <sup>a</sup>	13,29 <sup>ab</sup>	0,531 <sup>bc</sup>	34,39 <sup>bc</sup>
Huatusco	681,4 <sup>a</sup>	14990,1 <sup>c</sup>	14720,9 <sup>d</sup>	101,2 <sup>bc</sup>	48,0 <sup>c</sup>	3,97 <sup>a</sup>	5,91 <sup>c</sup>	13,09 <sup>cd</sup>	0,535 <sup>ab</sup>	34,24 <sup>bc</sup>
Las Lajas	680,9 <sup>a</sup>	16178,7 <sup>b</sup>	15269,2 <sup>bc</sup>	98,7 <sup>c</sup>	48,1 <sup>c</sup>	3,66 <sup>b</sup>	6,13 <sup>b</sup>	13,25 <sup>abc</sup>	0,532 <sup>bc</sup>	34,26 <sup>bc</sup>
Los Alpes	658,8 <sup>cd</sup>	15183,7 <sup>c</sup>	15314,5 <sup>b</sup>	100,2 <sup>bc</sup>	48,9 <sup>c</sup>	3,60 <sup>b</sup>	5,97 <sup>c</sup>	13,13 <sup>cd</sup>	0,529 <sup>c</sup>	34,39 <sup>bc</sup>
San Esteban	650,9 <sup>d</sup>	15376,3 <sup>c</sup>	15652,0 <sup>b</sup>	101,4 <sup>bc</sup>	48,9 <sup>c</sup>	3,68 <sup>b</sup>	6,10 <sup>b</sup>	13,21 <sup>bcd</sup>	0,537 <sup>a</sup>	34,57 <sup>ab</sup>
Tactic	667,1 <sup>b</sup>	15785,3 <sup>bc</sup>	15179,4 <sup>bcd</sup>	101,4 <sup>bc</sup>	48,9 <sup>bc</sup>	3,66 <sup>b</sup>	5,99 <sup>c</sup>	13,06 <sup>d</sup>	0,531 <sup>bc</sup>	34,79 <sup>a</sup>
Tutul	652,6 <sup>cd</sup>	15184,1 <sup>c</sup>	14795,6 <sup>cd</sup>	95,8 <sup>d</sup>	48,6 <sup>c</sup>	3,63 <sup>b</sup>	5,98 <sup>c</sup>	13,15 <sup>bcd</sup>	0,530 <sup>bc</sup>	34,17 <sup>c</sup>
Yucul	654,9 <sup>cd</sup>	15743,6 <sup>bc</sup>	15551,6 <sup>b</sup>	103,0 <sup>b<sup>bc</sup></sup>	48,8 <sup>c</sup>	3,69 <sup>b</sup>	6,11 <sup>b</sup>	13,37 <sup>a</sup>	0,533 <sup>abc</sup>	34,50 <sup>abc</sup>

C-SPIR : Module de rupture en compression axiale prédit par SPIR  
 EL-UScan : Module d'élasticité longitudinal mesuré par UScan  
 Infra-SPIR : Infradensité prédit par SPIR

EL-SPIR : Module d'élasticité longitudinal prédite par SPIR  
 N-SPIR : Dureté Monnin prédite par SPIR

<sup>a, ab, ...</sup> : Classification des groupes non significativement différents selon la méthode de Holm

PSF-SPIR : Point de Saturation des Fibres prédit par SPIR

Rr-SPIR : Retrait radial prédit par SPIR

Rt-SPIR : Retrait tangentiel prédit par SPIR

$\rho$  : Masse volumique

$\sigma_{F-SPIR}$  : Module de rupture en flexion longitudinale prédit par SPIR

**Classement des blocs selon les propriétés physico-mécaniques du bois des arbres dominants et co-dominants de Liquidambar de Mandraka**

	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	EL-UScan (Mpa)	EL-Bing (Mpa)	$\sigma_F$ (Mpa)	C (Mpa)	N	Rr (%)	Rt (%)	infra	PSF (%)
Nombre de mesure (n)	2532	1801	2532	2532	2532	2532	2532	2532	2532	2532
Bloc I	656,9 <sup>c</sup>	15201,8 <sup>c</sup>	15101,7 <sup>c</sup>	101,9 <sup>b</sup>	48,1 <sup>c</sup>	3,67 <sup>b</sup>	6,01 <sup>b</sup>	13,11 <sup>b</sup>	0,531 <sup>b</sup>	34,62 <sup>a</sup>
Bloc II	668,5 <sup>a</sup>	15751,6 <sup>ab</sup>	15671,5 <sup>b</sup>	98,6 <sup>c</sup>	48,8 <sup>b</sup>	3,62 <sup>c</sup>	5,99 <sup>c</sup>	13,10 <sup>b</sup>	0,533 <sup>a</sup>	33,94 <sup>c</sup>
Bloc III	659,9 <sup>c</sup>	15530,6 <sup>bc</sup>	14815,1 <sup>d</sup>	98,1 <sup>c</sup>	48,8 <sup>b</sup>	3,61 <sup>c</sup>	6,01 <sup>b</sup>	13,16 <sup>b</sup>	0,530 <sup>b</sup>	34,33 <sup>b</sup>
Bloc IV	664,0 <sup>b</sup>	16086,1 <sup>a</sup>	15954,7 <sup>a</sup>	108,1 <sup>a</sup>	50,2 <sup>a</sup>	3,83 <sup>a</sup>	6,23 <sup>a</sup>	13,41 <sup>a</sup>	0,535 <sup>a</sup>	34,74 <sup>a</sup>
<i>C-SPIR : Module de rupture en compression axiale prédit par SPIR</i> <i>EL-SPIR : Module d'élasticité longitudinal prédite par SPIR</i> <i><sup>a, ab, ...</sup> : Classification des groupes non significativement différents selon la méthode de Holm</i>										
<i>EL-UScan : Module d'élasticité longitudinal mesuré par UScan</i> <i>Infra-SPIR : Infradensité prédit par SPIR</i> <i>N-SPIR : Dureté Monnin prédite par SPIR</i>										
<i>PSF-SPIR : Point de Saturation des Fibres prédit par SPIR</i> <i>Rr-SPIR : Retrait radial prédit par SPIR</i> <i>Rt-SPIR : Retrait tangentiel prédit par SPIR</i> <i><math>\rho</math> : Masse volumique</i> <i><math>\sigma_F</math>-SPIR : Module de rupture en flexion longitudinale prédit par SPIR</i>										

## ANNEXE 7 : PARAMETRE DES MODELES DE REGRESSION DE LA MESURE DU MODULE D'ELASTICITE

### Régression entre module mesuré par UScan (EL-360) et mesuré par BING (EL-Bing) sur les éprouvettes de 360x20x20mm

Source	Valeur	Ecart-type	t	P	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	-1178,301	1985,420	-0,593	0,560	-5333,833	2977,231
EL-360	0,909	0,101	8,986	< 0,0001	0,697	1,121
SEC	560					
R <sup>2</sup>	0,81					
R <sup>2</sup> ajusté	0,80					

n=21

EL-360 : Module d'élasticité longitudinal estimé par UScan sur les éprouvettes de 360x20x20mm (Mpa)

EL-Bing : Module d'élasticité longitudinal estimé par BING sur les éprouvettes de 360x20x20mm (Mpa)

P : Probabilité de retour

SEC : Standard Erreur de Calibration

n : Nombre d'échantillon

### Régression entre module mesuré par BING (EL-Bing) sur les éprouvettes de 360x20x20mm et mesuré par UScan (EL-10) sur les éprouvettes de 10x20x20mm

Source	Valeur	Ecart-type	t	P	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	-2354,410	2818,754	-0,835	0,414	-8254,129	3545,310
EL-Bing	1,181	0,169	6,986	< 0,0001	0,827	1,535
SEC	950					
R <sup>2</sup>	0,72					
R <sup>2</sup> ajusté	0,71					

n=21

EL-10 : Module d'élasticité longitudinal estimé par UScan sur les éprouvettes de 10x20x20mm (Mpa)

EL-Bing : Module d'élasticité longitudinal estimé par BING sur les éprouvettes de 360x20x20mm (Mpa)

P : Probabilité de retour

SEC : Standard Erreur de Calibration

n : Nombre d'échantillon

**Régression entre module mesuré par UsScan (EL-360) sur les éprouvettes de 360x20x20mm et mesuré par UScan (EL-10) sur les éprouvettes de 10x20x20mm**

Source	Valeur	Ecart-type	t	P	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	-7585,520	2724,637	-2,784	0,012	-13288,251	-1882,789
EL-360	1,269	0,139	9,145	< 0,0001	0,979	1,560
SEC	770					
R <sup>2</sup>	0,815					
R <sup>2</sup> ajusté	0,805					
n=21						

EL-360 : Module d'élasticité longitudinal estimé par UScan sur les éprouvettes de 360x20x20mm (Mpa)

EL-10 : Module d'élasticité longitudinal estimé par UScan sur les éprouvettes de 10x20x20mm (Mpa)

P : Probabilité de retour

SEC : Standard Erreur de Calibration

n : Nombre d'échantillon

**Régression entre module estimé par SPIR (EL-SPIR) et mesuré par UScan (EL-UScan) sur les carottes de 1,5 cm de diamètre**

Régression linéaire entre EL-SPIR et EL-UScan sur les carottes

Source	Valeur	Ecart-type	t	P	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
Constante	2416,390	244,103	9,899	< 0,0001	1937,634	2895,146
EL-SPIR	0,865	0,016	54,795	< 0,0001	0,834	0,896
SEC	1650					
R <sup>2</sup>	0,63					
R <sup>2</sup> ajusté	0,63					
n=1801						

EL-SPIR : Module d'élasticité longitudinal prédite par SPIR (Mpa)

EL-UScan : Module d'élasticité longitudinal mesuré par UsScan (Mpa)

P : Probabilité de retour

SEC : Standard Erreur de Calibration

n : Nombre d'échantillon